
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Eléctrica



***“CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES DE OPERACIÓN
DE LA MÁQUINA DE CD”***

TESIS

**Que para obtener el Título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

Presenta

DAVID ULLOA ALFARO

Asesor

ING. GUSTAVO SAUCEDO ZAVALA

MORELIA, MICHOACÁN, ENERO 2012

Agradecimientos

A dios por darme la vida.

Con gran cariño quiero agradecerles a mis padres: Germán Ulloa y Ma. del Rosario Alfaro el gran apoyo que me brindaron para realizar mis estudios, ellos son el pilar de mis logros.

A mis hermanos Luis Ramón Ulloa, Ángel Jesús Ulloa y Erika Ulloa ya que ellos fueron mi gran motivación para poder terminar mi carrera. A mis primos, tíos y todos mis amigos de Sarabia y de Morelia

A mi asesor Ing. Gustavo Saucedo Zavala por brindarme su tiempo en todas las sesiones prestadas para llevar a cabo este proyecto.

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica por haberme formado como profesionista, a los maestros y compañeros de la carrera por su gran amistad, apoyo y por muchas experiencias, mil gracias.

Para todos ¡Muchas Gracias...!

Dedicatoria

A mis abuelos paternos Ramón Ulloa † y María Ninfa López †.

A mis abuelos maternos Nabor Tavares † y Silvina Paz.

A mis padres Germán Ulloa y Ma. Del Rosario Alfaro.

Contenido

Capítulo 1 Introducción	Páginas
1.1 Introducción -----	1
1.2 Antecedentes -----	1
1.3 Objetivos -----	2
1.4 Justificación -----	3
1.5 Metodología -----	3
1.6 Organización de la tesis -----	4
Capítulo 2 Conceptos y Principios Fundamentales de la Máquina de Corriente Directa.	
2.1 Introducción -----	5
2.2 El descubrimiento básico de Faraday-----	5
2.3 Formulación de Neumann-----	6
2.4 Relación de Fleming-----	7
2.5 La ley de Lenz-----	8
2.6 Fuerza contraelectromotriz -----	10
2.7 Otras leyes fundamentales -----	10
2.8 Partes principales de la máquina de cd-----	11
2.9 Reacción de armadura -----	15
2.10 Corrección del efecto de armadura-----	17
2.11 Construcción mecánica de la máquina de cd-----	18
2.12 Generador elemental -----	19
Capítulo 3 Operación de la Máquina de corriente directa operando como Motor.	
3.1 Introducción -----	22
3.2 Regulación de velocidad en motores de cd-----	23
	III

3.3 Ecuación de voltaje inducido (F_{cem}) y par generado del motor de cd.-----	24
3.4 Curva de saturación de la máquina de cd.-----	25
3.5 Relación fuerza, trabajo y potencia.-----	26
3.5.1 Fuerza.-----	26
3.5.2 Trabajo.-----	27
3.5.3 Potencia.-----	27
3.6 Pérdidas y eficiencia del motor de cd.-----	28
3.7 Motor cd con excitación separada y shunt (Derivación).-----	31
3.7.1 Comportamiento en terminales de un motor en shunt.-----	32
3.7.2 Control de velocidad en motores con excitación separada y shunt.---	35
3.7.2.1 Cambio de reóstato de campo.-----	35
3.7.2.2 Cambio de voltaje en la armadura.-----	36
3.7.3 Obtención experimental de la curva de saturación de la máquina de corriente directa.-----	37
3.7.4 Características experimentales del comportamiento del motor en excitación independiente.-----	39
3.7.5 Características experimentales del comportamiento del motor shunt-	43
3.8 Motor serie.-----	46
3.8.1 Comportamiento en terminales de un motor cd en serie. -----	47
3.8.2 Características experimentales del comportamiento del motor serie--	51
3.8.3 Motores en serie frente a los motores shunt (Derivación).-----	54
3.9 Motor de cd en conexión compuesta. -----	55
3.9.1 Motor en conexión compuesta acumulativa.-----	56
3.9.2 Comportamiento par-velocidad del motor compuesto acumulativo---	58

3.9.3 Control de velocidad del motor compuesto acumulativo -----	59
3.9.4 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto acumulativa larga.-----	59
3.9.5 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto acumulativa corta.-----	63
3.9.6 Motor en conexión compuesta diferencial.-----	67
3.9.7 Comportamiento par-velocidad de un motor compuesto diferencial---	69
3.9.8 Control de velocidad en motores compuesto diferencial.-----	70
3.9.9 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto diferencial larga -----	71
3.9.10 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto diferencial corta.-----	73
3.9.11 Resumen sobre las diferentes conexiones del motor cd.-----	75

Capítulo 4 Operación de la Máquina de Corriente Directa como generador.

4.1 Introducción a los generadores de cd-----	77
4.2 Regulación de voltaje en los generadores de cd-----	78
4.3 Ecuación de voltaje generado (fem). -----	79
4.4 Pérdidas y eficiencia del generador de cd -----	79
4.4.1 Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre-----	80
4.4.2 Pérdidas en las escobillas -----	81
4.4.3 Pérdidas en el núcleo -----	82
4.4.4 Pérdidas mecánicas -----	82
4.4.5 Pérdidas dispersas (pérdidas misceláneas) -----	82

4.5	Generador con excitación independiente -----	83
4.5.1	Comportamiento en terminales de un generador con excitación independiente -----	84
4.5.2	Control de voltaje del generador en conexión independiente-----	84
4.5.3	Características experimentales del comportamiento del generador en excitación independiente.-----	85
4.6	Generador de cd en conexión shunt (derivación)-----	88
4.6.1	Aumento de voltaje en un generador shunt -----	89
4.6.2	Control de voltaje del generador en conexión shunt -----	90
4.6.3	Características experimentales del comportamiento del generador en conexión shunt. -----	90
4.7	Generador de cd en conexión serie -----	93
4.7.1	Comportamiento en terminales de un generador serie-----	95
4.7.2	Características experimentales del comportamiento del generador serie. -----	95
4.8	Generador compuesto.-----	97
4.8.1	Generador compuesto acumulativo -----	97
4.8.2	Comportamiento en las terminales de un generador compuesto acumulativo -----	99
4.8.3	Control de voltaje en generadores compuestos acumulativos-----	102
4.8.4	Características experimentales del comportamiento del generador compuesto en conexión acumulativa larga. -----	102

4.8.5 Características experimentales del comportamiento del generador	
compuesto en conexión acumulativa corta. -----	105
4.8.6 Generador compuesto diferencial. -----	108
4.8.7 Comportamiento en terminales de un generador compuesto	
diferencial. -----	109
4.8.8 Control de voltaje en generadores compuestos diferenciales -----	110
4.8.9 Características experimentales del comportamiento del generador	
compuesto en conexión diferencial larga.-----	111
4.8.10 Características experimentales del comportamiento del generador	
compuesto en conexión diferencial corta.-----	113
4.8.11 Resumen sobre las diferentes conexiones del generador de cd---	114
Capítulo 5 Conclusiones sobre la máquina de cd.	
5.1 Conclusiones generales -----	117
5.2 Conclusiones particulares -----	118
Referencias -----	120

Lista de Figuras

	Páginas
Figura 2-1 Relación de Faraday -----	6
Figura 2-2 Regla de Fleming de la mano derecha. -----	8
Figura 2-3 Fuerza magnética sobre un conductor. -----	9
Figura 2-4 Fuerza contraelectromotriz. -----	10
Figura 2-5 Distribución del flujo magnético debido sólo a los polos de campo---	15
Figura 2-6 Distribución del flujo magnético debido sólo a la excitación de la armadura. -----	16
Figura 2-7 Distribución combinada del flujo debido a la armadura y el campo.-----	16
Figura 2-8 Estructura magnética de un motor o generador de cd. -----	19
Figura 2-9 Generador elemental. -----	20
Figura 2-10 a) Posiciones angulares instantáneas b) Voltaje generado contra posición angular. -----	21
Figura 2-11 Voltaje generado contra posición angular.(basado en lo mismo que En la figura 2-10a y 2-10b) -----	21
Figura 3-1 Curva de magnetización de una máquina de cd-----	26
Figura 3-2 Diagrama de flujo de potencia para un motor de CD. -----	28
Figura 3-3 Circuito equivalente de un motor de cd en excitación independiente.--	32
Figura 3-4 Circuito equivalente de un motor cd shunt. -----	32

Figura 3-5 Característica par-velocidad del motor cd en conexión separada y shunt. -----	34
Figura 3-6 Característica par-velocidad del motor cd con reacción de armadura.-----	35
Figura 3-7 Control de la corriente de campo de un motor en conexión shunt por medio del reóstato de campo. -----	36
Figura 3-8 Control de voltaje de la armadura de un motor shunt. -----	37
Figura 3-9 Curva de saturación. -----	39
Figura 3-10 Característica par-velocidad, conexión independiente.-----	41
Figura 3-11 Característica par-velocidad, conexión shunt. -----	44
Figura 3-12 Circuito equivalente de un motor en conexión serie. -----	47
Figura 3-13 Característica par-velocidad de un motor cd en serie. -----	50
Figura 3-14 Característica par-velocidad de la conexión serie.-----	52
Figura 3-15 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta acumulativa larga.-----	56
Figura 3-16 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta acumulativa corta. -----	56
Figura 3-17 Característica par-velocidad del motor cd compuesto acumulativo en comparación con los motores serie y shunt. -----	59
Figura 3-18 Característica par-velocidad, acumulativa larga. -----	61
Figura 3-19 Característica par-velocidad, acumulativa corta. -----	65
Figura 3-20 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta diferencia larga. -----	68

Figura 3-21 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta diferencial	
corta. -----	68
Figura 3-22 Característica par-velocidad de un motor de cd, compuesto	
diferencial. -----	70
Figura 3-23 Característica par-velocidad, diferencial larga. -----	72
Figura 3-24 Característica par-velocidad, diferencial corta. -----	74
Figura 3-25 Características par-velocidad para las conexiones del motor cd. -----	75
Figura 4-1 Diagrama de flujo de potencia para un generador de CD.-----	80
Figura 4-2 Circuito equivalente del generador con excitación independiente. ----	83
Figura 4-3 Característica voltaje-corriente, excitación independiente. -----	86
Figura 4-4 Circuito equivalente de un generador shunt. -----	88
Figura 4-5 Característica voltaje-corriente, conexión shunt. -----	91
Figura 4-6 Circuito equivalente del generador serie. -----	94
Figura 4-7 Característica voltaje-corriente, en conexión serie. -----	96
Figura 4-8 Circuito equivalente del generador en conexión compuesta	
acumulativa larga. -----	98
Figura 4-9 Circuito equivalente del generador en conexión compuesta	
acumulativa corta. -----	99
Figura 4-10 Características en las terminales del generador cd, compuesta	
acumulativa. -----	101

Figura 4-11	Generador cd compuesto acumulativo con resistencia de desviación-	101
Figura 4-12	Característica voltaje-corriente, conexión acumulativa larga. -----	103
Figura 4-13	Característica voltaje-corriente, conexión acumulativa corta. -----	106
Figura 4-14	Circuito equivalente de un generador compuesto diferencial larga--	108
Figura 4-15	Circuito equivalente de un generador compuesto diferencial corta--	109
Figura 4-16	Características en las terminales de un generador cd compuesto diferencial. -----	110
Figura 4-17	Característica voltaje-corriente, conexión diferencial larga. -----	112
Figura 4-18	Característica voltaje-corriente, conexión diferencial corta. -----	114
Figura 4-19	Características voltaje-corriente para las conexiones del generador cd. -----	115

Lista de Tablas

	Páginas
Tabla 3-1 Relación de unidades de fuerza. -----	26
Tabla 3-2 Relación de unidades de Trabajo. -----	27
Tabla 3-3 Relación de unidades de potencia. -----	27
Tabla 3-4 Datos obtenidos en la prueba de saturación. -----	38
Tabla 3-5 Resultados obtenidos en la conexión independiente. -----	40
Tabla 3-6 Resultados obtenidos en la conexión shunt. -----	43
Tabla 3-7 Resultados obtenidos en la conexión serie. -----	51
Tabla 3-8 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa larga. -----	60
Tabla 3-9 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa corta. -----	64
Tabla 3-10 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial larga. -----	71
Tabla 3-11 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial corta. -----	73
Tabla 4-1 Resultados obtenidos en la conexión excitación independiente. -----	86
Tabla 4-2 Resultados obtenidos en la conexión shunt. -----	90
Tabla 4-3 Resultados obtenidos en la conexión serie. -----	95
Tabla 4-4 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa larga. -----	102

Tabla 4-5 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa

corta. ----- 105

Tabla 4-6 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial

larga. ----- 111

Tabla 4-7 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial

corta. ----- 113

Lista de símbolos y abreviaturas.

CD	Corriente directa	N_s	Número de espiras en serie
CA	Corriente alterna	HP	Caballo de fuerza
E_a	Voltaje generado.	R	Resistencia
t	Tiempo	lb	Libras-Fuerza
Φ	Flujo magnético	N	Newtons
f_{cem}	Fuerza contraelectromotriz	SI	Sistema internacional de unidades
N	Polo norte	ft	Pies
S	Polo sur	m	Metro
SR	Regulación de velocidad	seg	Segundos
n_v	Velocidad en vacío	KW	Kilowatt
n_{pc}	Velocidad a plena carga	W	Watt
K	Constante de la máquina	P_{esc}	Pérdidas en escobillas
n	Velocidad en RPM	P_{in}	Potencia de entrada
τ_{ind}	Par inducido	P_{out}	Potencia de salida
I_a	Corriente de armadura	V_t	Voltaje en terminales
F	Fuerza magnetomotriz	$I_{línea}$	Corriente de línea
N_F	Número de espiras en el campo	R_f	Resistencia de campo
I_F	Corriente de campo	V_f	Voltaje de campo
		R_a	Resistencia de armadura

I_{nom}	Corriente nominal.	ω_m	Velocidad mecánica
I_f	Corriente de campo	Φ_{res}	Flujo residual
τ_{carga}	Par de carga	I_{se}	Corriente en el devanado serie
R_{ajuste}	Resistencia de ajuste	F_s	Fuerza magnetomotriz del campo serie
τ_{app}	Par aplicado	F_{AR}	Fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura
P_{conv}	Potencia convertida	F_{tot}	Fuerza magnetomotriz total
R_s	Resistencia serie	R_{div}	Resistencia divisora
C	Constante de proporcionalidad	I_{eq}	Corriente equivalente de campo
SCR	Rectificador controlado por silicio.	P_{cu}	Pérdidas en el cobre
mph	Millas por hora	$P_{núcleo}$	Pérdidas en el núcleo
L_{se}	Inductancia serie	P_{mec}	Pérdidas mecánicas
L_f	Inductancia de campo	P_{misc}	Pérdidas misceláneas
F_{net}	Fuerza magnetomotriz neta	V_{nom}	Voltaje nominal.
F_f	Fuerza magnetomotriz de campo	V_{BD}	Caída de voltaje en escobillas
I_f^*	Corriente de campo efectiva	RPM	Revoluciones por minuto.
VR	Regulación de voltaje		
n	Eficiencia		
P_a	Pérdidas en la armadura		
P_f	Pérdidas en el campo		
Z	Polos de campo		

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción.

Aún que en el sector industrial el empleo de las máquinas de corriente directa (cd) es menor, es una de las más versátiles en la industria por su fácil control de posición, par y velocidad. Las máquinas de corriente continua (de cc o cd) transforman la energía mecánica en energía eléctrica (de corriente continua), o viceversa, se les llama generadores o motores respectivamente.

La operación de la máquina de cd se basa al igual que las máquinas de corriente alterna (ca) en la ley de inducción electromagnética de Faraday. El voltaje inducido en la armadura se obtiene por medio del movimiento relativo de los devanados de la bobina de armadura, entre el flujo magnético producido por los polos de campo. Cuando una espira se introduce dentro de un campo magnético y se hace girar, ésta espira corta las líneas de flujo magnético, induciéndose voltaje en los extremos de la espira, éste voltaje es alterno y se utiliza en dispositivo mecánico llamado conmutador para obtener voltaje de cd. Todas estas máquinas tienen 2 partes principales que son la estructura de campo magnético (estator) donde se produce el campo magnético, y una armadura giratoria (rotor) donde se induce el voltaje.

1.2 Antecedentes.

En todos los libros existentes sobre máquinas eléctricas se describe en uno o varios capítulos un análisis del comportamiento detallado sobre éste tipo de máquinas. Por ejemplo el libro que lleva por nombre: Máquinas eléctricas del autor A. E. Fitzgerald en el cual se explica con bastante detalle desde los principios básicos de operación, hasta las técnicas existentes en la actualidad para el control y manejo de dicha máquina.

Por otra parte existe otro libro, el cual nos muestra las pruebas que se le deben realizar a este tipo de máquina, para obtener sus características de operación. En él se muestran las conexiones a realizar y el procedimiento paso a paso para obtener los resultados de la mejor manera posible. Este libro se apoya en tablas que el practicante debe de ir llenando con sus resultados y al igual ir graficándolos para el mejor entendimiento de la máquina.

1.3 Objetivos.

Un objetivo importante de esta tesis, de manera personal es adquirir amplio conocimiento del funcionamiento y operación experimental de la máquina de cd en las diferentes conexiones. También saber distinguir los diagramas de conexiones, e interpretar todas sus fórmulas para obtener sus diferentes parámetros por ejemplo: velocidad, par, flujo de campo, voltaje en terminales, corrientes de excitación etc. Identificar las partes básicas de la máquina.

Otro objetivo importante es que los alumnos que se encuentren en la Facultad de Ingeniería Eléctrica, conocerán los principios fundamentales de operación de la máquina de cd de una manera un poco más clara, entenderán y sabrán interpretar los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas. Les servirá para comparar estos resultados con los resultados obtenidos por ellos mismos en sus prácticas de laboratorio. Los lectores comprenderán de una manera eficaz el contenido de esta tesis para poder analizar el comportamiento real de la máquina, entenderán los resultados mostrados y sabrán el porqué se obtuvieron dichos resultados.

1.4 Justificación.

Las razones principales que han motivado a la realización de la presente tesis, es debido a que en los 6 años que duro la carrera, en la materia de máquinas eléctricas que se imparte en el programa para ingeniería eléctrica, se estudia a fondo la teoría sobre las máquinas de cd y al mismo tiempo se va complementando dicha teoría con las prácticas en el laboratorio de la facultad con dichas máquinas, pero a menudo surgen varias y pequeñas dudas que no dejan claro en su totalidad el comportamiento de estas máquinas. Por esta razón se decide realizar esta tesis sobre máquinas eléctricas de corriente directa (cc o cd), ya que en la presente tesis se tendrá la facilidad de conocer más a fondo sus parámetros y características, por tanto aclarar las dudas que se tengan sobre ellas.

El resultado de ésta investigación como ya se mencionó, beneficiará mucho ya que se aclarará todo lo relacionado con la operación y análisis de la máquina de cd, también brindará ayuda a los alumnos en la Facultad de Ingeniería Eléctrica, cuando se encuentren realizando sus prácticas en el laboratorio con este tipo de máquinas. Ya que servirá de apoyo en sus resultados obtenidos en cada una de sus prácticas, haciendo comparaciones entre sus resultados obtenidos y los mostrados en esta tesis.

1.5 Metodología.

La metodología utilizada en este trabajo de tesis es la de investigar cada una de las conexiones de la máquina de cd y estar documentando toda la información. La mayoría de esta información se obtuvo en libros de máquinas eléctricas y en consultas con el asesor de tesis. Después de entender estos conceptos se procede a realizar las pruebas en el laboratorio para cada conexión de la máquina, se debe de ser muy exacto en todas y cada una de las mediciones para obtener el mejor resultado posible.

Se espera que el análisis y comportamiento de la máquina en el laboratorio deba ser lo más apegado a la teoría documentada. La máquina puede comportarse de una manera no muy apegada a la teoría pero es porque se trabaja de una manera real. Ya que varios libros se basan en comportamientos de la máquina de una manera ideal.

1.6 Organización de la tesis.

Esta tesis está conformada por 5 capítulos, desarrollada de la forma siguiente.

Capítulo 1. En éste capítulo se da una introducción, antecedentes, objetivos, justificación y metodología para el desarrollo de ésta tesis.

Capítulo 2. Se desarrollará y se darán los conceptos básicos y principios de operación de la máquina de cd.

Capítulo 3. Se desarrollarán los modos de operación para cada tipo de conexión de la máquina de cd, operando como motor. Exponiendo los resultados experimentales.

Capítulo 4. Se desarrollarán los modos de operación para cada tipo de conexión de la máquina de cd, operando como generador. Exponiendo los resultados experimentales.

Capítulo 5. Por último en este capítulo se darán las conclusiones sobre lo desarrollado.

CAPÍTULO 2

Conceptos y Principios Fundamentales de la Máquina de Corriente Directa.

2.1 Introducción.

Generador es toda máquina que convierte energía mecánica en eléctrica. Motor es la máquina que convierte energía eléctrica en mecánica. Sin embargo, una misma máquina se puede usar como motor y como generador. El papel más importante que desempeña el generador de cd es alimentar de electricidad el motor de cd. En esencia, produce corriente libre de rizo y un voltaje fijo de manera muy precisa a cualquier valor deseado desde cero hasta el valor máximo nominal; ésta es en realidad una corriente eléctrica de cd que permite la mejor conmutación posible.

Hay otros dispositivos importantes que tienen como entrada la energía mecánica y la convierten en energía eléctrica, así como aquellos que reciben energía eléctrica y la convierten en fuerza mecánica o movimientos apropiados. Estos dos aspectos de la conversión de la energía se manejan, tanto en la parte mecánica a eléctrica, mediante los generadores, y en la parte eléctrica a mecánica mediante los motores. En los motores y generadores los medios de acoplamiento entre las energías mecánica y eléctrica consisten en campos magnéticos ubicados y controlados en forma apropiada.

2.2 El descubrimiento básico de Faraday.

En 1831, el científico Michael Faraday descubrió que cuando se hacía trabajo mecánico para mover un conductor en circuito cerrado en un campo magnético, se producía un voltaje que a su vez hacía fluir una corriente. Faraday le llamó voltaje inducido ya que se generaba sin que hubiera contacto entre el imán y el conductor.

Todos los motores y generadores dependen en forma directa de su aplicación. Asociado con lo anterior se hallaba el hecho, ya conocido en aquel entonces, de que el magnetismo se podía generar mediante una corriente eléctrica circulando en un alambre. Se sabía que polos magnéticos iguales se repelían y que polos opuestos se atraían. El conjunto de estos fenómenos, gobernado por leyes eléctricas adicionales, es lo que ha hecho posible la existencia de motores y generadores. Hasta el momento en que Faraday hiciera su descubrimiento, la única forma de producir una corriente eléctrica en forma continua consistía en la conversión de energía química a eléctrica que se llevaba a cabo en una pila.

Como se muestra en la figura 2-1 si un conductor se mueve a través de un campo magnético entonces se genera un voltaje. La ley de Faraday puede enunciarse como sigue: El voltaje inducido en una bobina o espira de un conductor es proporcional a la rapidez de cambio de las líneas de fuerza que atraviesan la bobina.

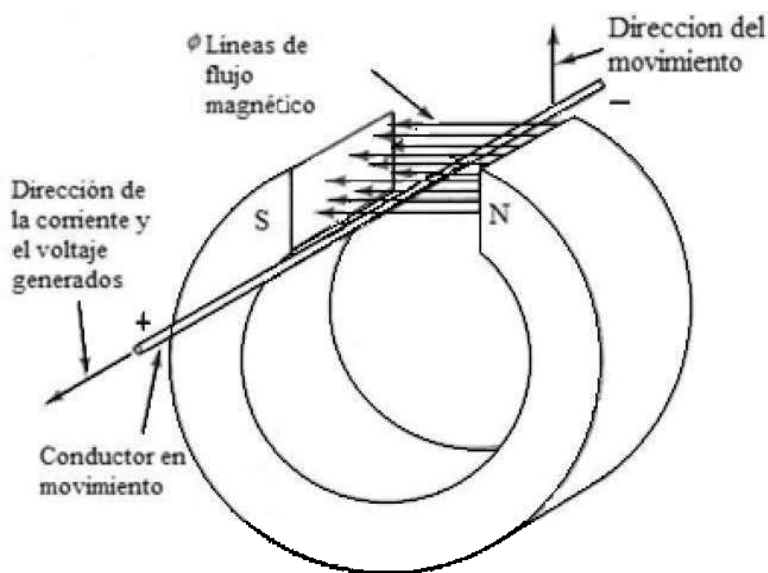


Fig 2-1 Relación de Faraday

2.3 Formulación de Neumann

En 1845, después de 14 años del descubrimiento de Faraday se obtuvo otro logro, esta vez a cargo de Franz Ernest Neumann quien pudo cuantificar la proposición de Faraday mediante la ecuación 2-1.

$$E = n \frac{\Phi}{t} \quad 2-1$$

Donde:

E = Fem inducida en volts.

n = Número de espiras.

Φ = Es el flujo en líneas o maxwells (en el sistema inglés) o en webers (sistema SI) que es enlazado o atravesado por una sola espira cuando se pasa de un flujo nulo a un máximo.

t = Tiempo en segundos en el cual las líneas de flujo son enlazadas por las vueltas de alambre conforme éste se mueve a través del campo magnético.

Donde el voltaje producido era directamente proporcional a la rapidez del cambio de las líneas de fuerza enlazadas, o bien un cambio más rápido de los enlaces hará que aumente el voltaje generado.

2.4 Relación de Fleming.

En el trabajo de electricidad, existen muchas reglas de la mano derecha o de la mano izquierda ya que son formas convenientes de recordar ciertas relaciones cuando las polaridades y las direcciones desempeñan un papel fundamental. Una de las primeras reglas de este tipo se la debemos a Fleming que relacionó la obra de Faraday como sigue:

Si el campo magnético se considera estacionario en el espacio, el conductor se considera entonces moviéndose en forma perpendicular a él.

Los dedos pulgar, índice y medio de la mano derecha se extienden formando ángulos rectos entre sí, y con este arreglo el campo magnético viene representado por el dedo índice, que va del polo norte al polo sur en la dirección en la que apunta el dedo. Si se considera que el pulgar apunta en la dirección del movimiento del conductor, entonces el

dedo medio apuntará en la dirección del flujo de la corriente convencional. Como lo muestra la figura 2-2.

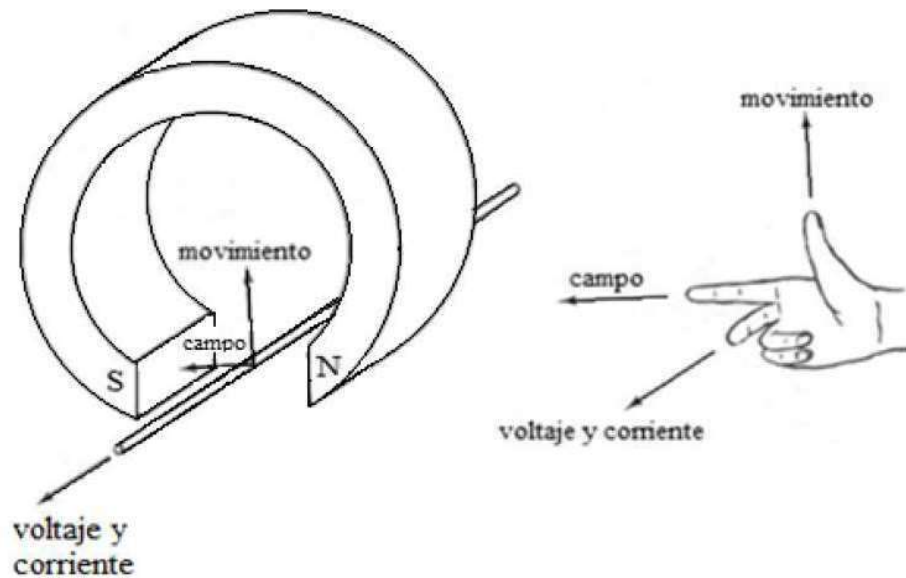


Fig 2-2. Regla de Fleming de la mano derecha

2.5 La ley de Lenz.

Todavía con relación al trabajo pionero de Faraday, Heinrich Lenz enunció en 1833, dos años después del descubrimiento de Faraday, una relación que es básica en la transformación de la energía electromecánica; dice lo siguiente:

En todos los casos de inducción electromagnética, el voltaje inducido hará que la corriente circule en un circuito cerrado en una dirección tal que el campo magnético originado por esta corriente se oponga a la causa que lo produce.

$$E = -n \frac{\Phi}{t} \quad 2-2$$

El signo menos (-) indica que se opone a la causa que lo produjo (Ley de Lenz). Ya se anticipó que, al igual que una corriente crea un campo magnético, un campo magnético puede crear una corriente eléctrica. Esto es una consecuencia del principio de conservación de la energía. Es fundamental en el funcionamiento de inductancias, transformadores,

motores y generadores. Lo que se ha dicho hasta este punto, con relación a los motores y generadores, se ilustra en la figura 2-3.

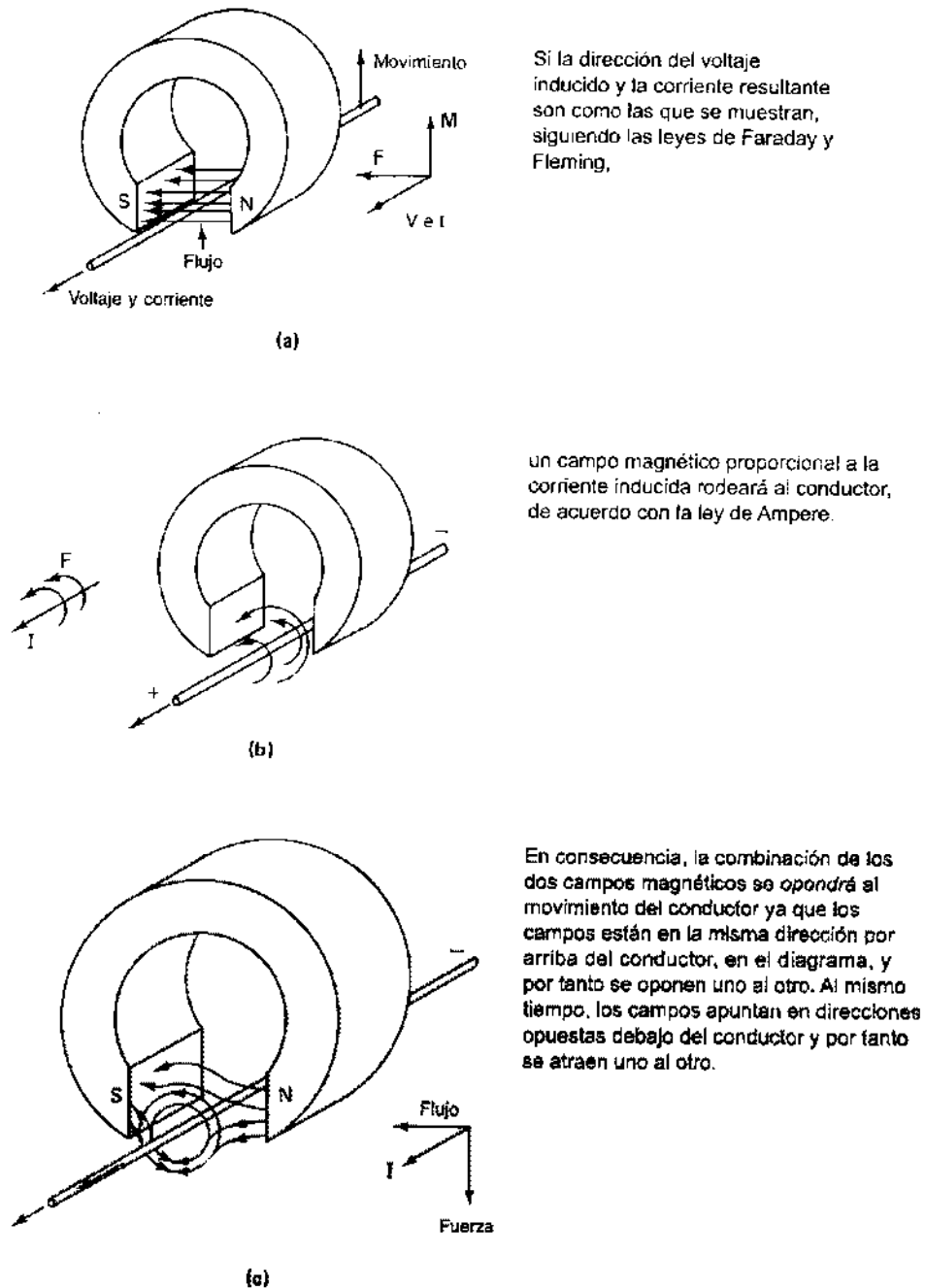


Fig. 2-3 Fuerza magnética sobre un conductor.

2.6 Fuerza contraelectromotriz.

Es la tensión que se crea en los conductores de un motor como consecuencia del corte de las líneas de fuerza, se conoce como fuerza contraelectromotriz y es el efecto generador. La **fuerza contraelectromotriz** es proporcional a la velocidad del motor y a la intensidad del campo magnético. Para el estudio de los motores, se pueden suponer éstos como un generador, cuya fuerza electromotriz se opone al paso de la corriente, por lo que se le llama FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ, en serie con una resistencia interna. De acuerdo con la ley de Lenz, una fmm inducida de este tipo debe oponerse a la corriente que se suministra al motor. Por esta razón, a la fmm inducida en un motor se le llama fuerza contraelectromotriz. Como lo muestra la figura 2-4.

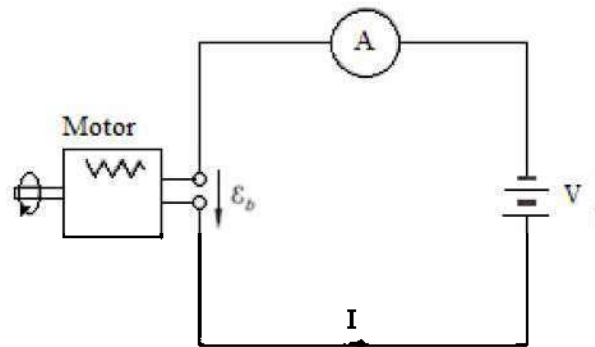


Fig. 2-4 Fuerza contraelectromotriz.

2.7 Otras leyes fundamentales.

Todas las máquinas eléctricas rotatorias, así como los transductores especializados relacionados con ellas, operan bajo los mismos principios y obedecen las mismas leyes fundamentales. A continuación se enumeran y se identifican estas relaciones clave con el crédito debido a sus descubridores:

- (1) Ley de inducción de Faraday. Esta ley fue cuantificada por Neumann y relacionada en forma especial por Fleming. Más adelante Lenz, clarificó su significado en las relaciones transitorias para la inducción magnética.

- (2) Leyes de los voltajes y corrientes de Kirchhoff relativas a los circuitos eléctricos. Estas leyes permiten entender y predecir las relaciones en los arreglos en serie y en paralelo de las bobinas de la máquina y los circuitos de carga.
- (3) Ley de los circuitos magnéticos de Ampere. Permite entender y diseñar la parte magnética de las máquinas.
- (4) La importantísima ley fundamental de Ohm relaciona el voltaje, la corriente y la resistencia, y permite establecer las proporciones en las bobinas de motores y generadores.
- (5) Ley de Biot y Savart proporciona la fuerza que en un campo magnético ejerce sobre un conductor, mediante la que se calculan las fuerzas producidas por un motor y las fuerzas de entrada requeridas para accionar un generador.
- (6) El cálculo de Watt de la relación entre fuerza, trabajo, tiempo y potencia. Mediante éste se cuantificó el término caballo de fuerza. Aun cuando James Watt no hizo trabajos sobre electricidad, los conceptos que desarrolló fueron reconocidos al darse el nombre de Watt a la unidad de potencia eléctrica.

2.8 Partes principales de una máquina de cd.

- **Carcasa.**

Se requiere como una trayectoria de retorno para todo el flujo magnético circulante que pasa de los polos del campo a la armadura. Este requisito de conducción del flujo determina la sección transversal necesaria del material magnético, que por lo general es un acero al carbón. La construcción más usual consiste en una estructura de anillo y debe ser torneada de modo que su superficie interior sea un cilindro.

- **Polos de campo.**

Los polos del campo se hacen por lo general, pero no siempre, de láminas delgadas de aleaciones de acero altamente magnéticas. La construcción laminada es necesaria en el extremo interior o zapata de los polos del campo. Esto es debido a las pulsaciones de la magnitud del campo que resultan cuando la estructura magnética del rotor de la armadura pasa frente a la zapata del polo. Las variaciones del campo producen corrientes parásitas

internas generadas en una estructura magnética. Estas corrientes son pérdidas que se pueden evitar, en gran medida, con las estructuras magnéticas laminadas, las cuales permiten que el flujo magnético pase a lo largo de la longitud de las laminaciones, pero no permiten que las corrientes parásitas circulen a través de la estructura de una lámina a otra.

- **Estructura de la armadura.**

La estructura de la armadura tiene una doble función, ya que por una parte es el aislamiento de los alambres del devanado que pasan a través del campo magnético, y por otra es una fracción sustancial del circuito de flujo magnético. Dado que cualquier parte de la estructura magnética de la armadura recibe inversiones cíclicas en la dirección del flujo magnético, está sujeta a pérdidas más severas por corrientes parásitas y pérdidas por histéresis que las zapatas de los polos del campo y se construye, por tanto, en forma invariablemente laminada.

- **Bobinas del devanado de la armadura.**

En las bobinas del devanado de la armadura es donde se induce el voltaje, se colocan en ranuras de diversas disposiciones o arreglos. Aun cuando la configuración de estas bobinas se hace desde un punto de vista eléctrico, deben disponerse de manera mecánica de tal modo que se puedan montar en las ranuras de las láminas. Esta montura debe estar asegurada mecánicamente contra fuerzas centrífugas y pares; debe estar apropiadamente aislada y debe permitir el ensamblaje más simple posible. El núcleo queda fijado a un eje, cuyos extremos se deslizan apoyados en cojinetes fijos a la carcasa. De esta forma el inducido se sustenta entre las piezas polares del inductor, pudiendo ser impulsado en un movimiento de rotación rápido.

- **El conmutador.**

El conmutador sirve para convertir la corriente alterna (ca) generada en corriente continua (cc ó cd). En el eje de la armadura se fija el conmutador o colector de delgas formado por láminas de cobre electrolítico con el fin de poderle conectar los diferentes circuitos del inducido. Las delgas se aíslan del eje y entre sí por hojas de mica.

- **Escobillas.**

La función de conmutación la realizan conjuntamente el conmutador y las escobillas, las cuales se hacen generalmente de una mezcla de carbono, grafito o carbono relleno de cobre. Son piezas conductoras destinadas a asegurar, por contacto deslizante, la conexión eléctrica de una parte móvil con una parte fija.

Las escobillas se mantienen en contacto con el conmutador cada 180 grados eléctricos. Estas escobillas tienen las polaridades positiva y negativa en forma alternada. Hay el mismo número de escobillas que polos en el campo principal; por lo tanto, una máquina de ocho polos tendrá ocho escobillas o juegos de escobillas igualmente espaciados alrededor del conmutador.

Los puntos de máximo voltaje positivo y voltaje negativo mínimo se hallan donde se deben colocar los centros de las escobillas. A estos puntos se les llama posiciones neutras de las escobillas. Cuando las escobillas se colocan en sus puntos neutros, el máximo voltaje disponible de la máquina se puede conectar y usar. Sin embargo, los problemas comienzan cuando se extraen corrientes grandes de las escobillas y por ende de los devanados de la armadura. Estos problemas se deben a la reacción de armadura y a la reactancia de la armadura.

- **Entrehierro.**

Es el espacio comprendido entre las expansiones polares y el inducido; suele ser normalmente de 1 a 3 mm, lo imprescindible para evitar el rozamiento entre la parte fija y la móvil.

- **Cojinetes o chumaceras.**

Los cojinetes o chumaceras son las piezas que sirven de apoyo y fijación del eje de la armadura. Se requieren para que la armadura pueda girar libremente y al mismo tiempo esté confinada en su posición correcta. Además los cojinetes se necesitan para limitar el desplazamiento axial de la armadura como un todo. Por último los cojinetes deben soportar todas las fuerzas debidas a las bandas, engranes, acoplamientos (coples) y otros mecanismos montados en forma directa.

- **Estructura de los extremos de campana.**

La localización geométrica de los cojinetes con respecto a la carcasa se controla mediante los extremos de campana, que son estructuras cubiertas que cierran la máquina.

- **Portaescobillas.**

Las escobillas se mantienen en su lugar mediante los portaescobillas, apoyados en una de las campanas. Se utilizan diversos tipos de portaescobillas, dependiendo del tamaño, número de escobillas, ventilación y necesidades de acceder para el mantenimiento.

- **Bobinas de campo.**

Hasta ahora se ha hecho una descripción a partir de la carcasa hacia adentro, pero desde el punto de vista magnético, sin haberse mencionado aún cómo se va a generar el campo magnético. Esto último se logra usando las bobinas de campo, que rodean a los polos del campo. Se emplean varios tipos de combinaciones de bobinas, por ejemplo:

1. **Bobina en derivación (shunt).** Las cuales dependen de si hay muchas vueltas de alambre relativamente delgado diseñado para producir los ampere-vueltas que se requieren con una pequeña corriente del voltaje de línea,
2. **Bobina en serie.** Se le llama bobina en serie porque se conecta en serie con la línea principal de la armadura. Estas bobinas tienen pocas vueltas de alambre más grueso diseñado para trabajar con una caída de voltaje pequeña. Cuando están presentes los dos tipos de embobinado, se dice que la combinación es un campo compuesto.

- **Campos de conmutación.**

En las máquinas de corriente continua (cc ó cd) más grandes, es decir, en aquellas con una potencia de 1 hp o 1 Kw hacia arriba, entre los polos principales del campo se colocan campos de conmutación, los cuales son más pequeños que los polos de campo principales pero se construyen en forma similar. Siempre se conectan en serie con la armadura. Operan modificando localmente la resultante de los campos magnéticos que producen la armadura y los polos del campo principal.

- **Devanado de compensación.**

En las unidades más grandes de uso pesado puede encontrarse un devanado de compensación, el cual se instala en las caras de las zapatas de los polos de los campos principales.

El devanado de compensación se requiere, además de los campos de conmutación, con el objeto de que el proceso de conmutación este libre chispas cuando circulen corrientes muy altas o bien en condiciones transitorias.

2.9 Reacción de armadura.

La forma y disposición del campo magnético que generan los campos principales se ven distorsionados cuando circulan corrientes en los devanados de la armadura, ya que éstos también están produciendo una estructura magnética. El campo magnético producido en la armadura está desfasado 90 grados eléctricos de los campos principales. Estos dos campos se combinan en forma vectorial dando por resultado un campo distorsionado. En la figura 2-5 se muestra el campo magnético típico no distorsionado de un polo de campo cuando en la armadura circula una corriente nula, o casi nula.

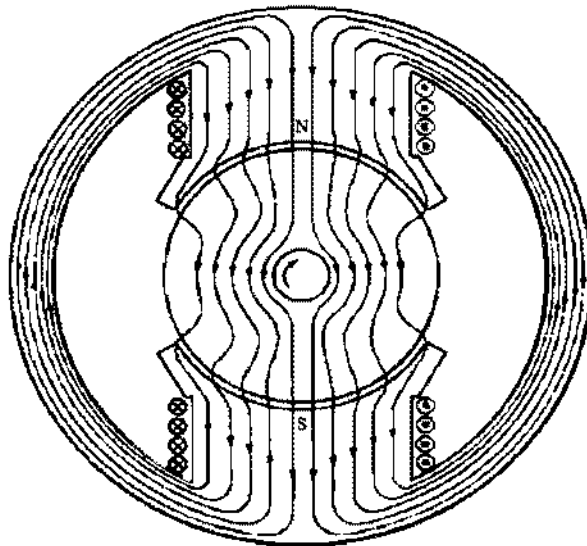


Fig 2-5 Distribución del flujo magnético debido sólo a los polos de campo.

Luego, en la figura 2-6 se ve el campo producido por la armadura que sólo existe cuando pasa corriente por los conductores de la misma. Es decir, sólo cuando la máquina trabaja en carga.

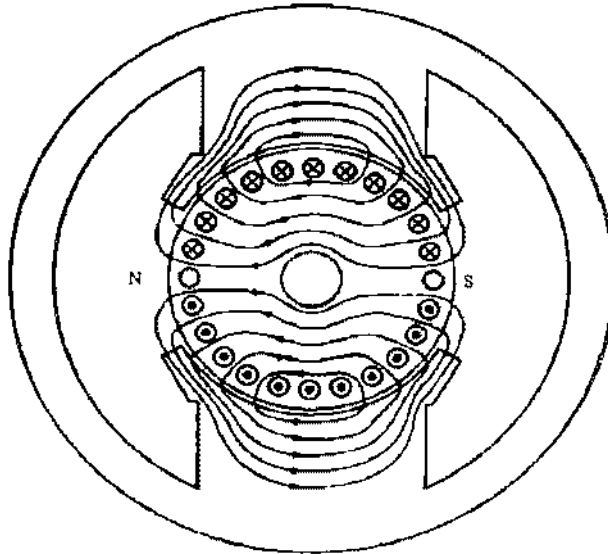


Fig. 2-6 Distribución del flujo magnético debido sólo a la excitación de la armadura.

En la figura 2-7 se muestra el resultado de la combinación de los campos. Caso que realmente ocurre cuando existe el campo principal y simultáneamente circula corriente por la armadura.

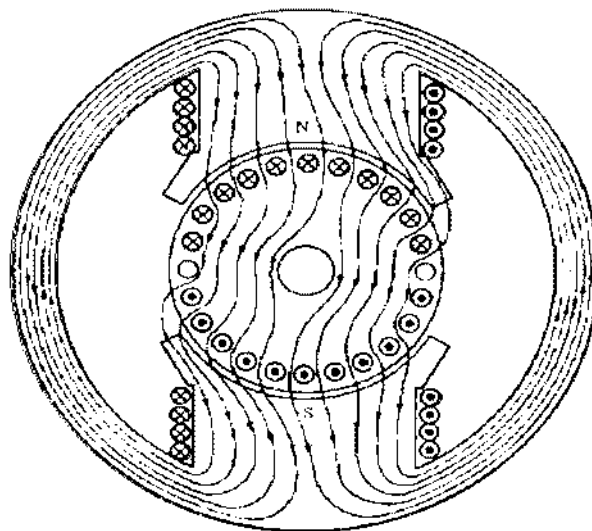


Fig. 2-7 Distribución combinada del flujo debido a la armadura y el campo.

El campo magnético en uno de los lados del polo de campo se ve reducido; el campo del polo central es casi el mismo que cuando no hay corriente en la armadura, mientras que en el otro lado del polo de campo esté se incrementa en forma sustancial. Por desgracia, los voltajes que generan los devanados van en proporción directa al campo real que esté presente.

Siguiendo estos razonamientos, se ve que esta reacción de la armadura hace que los puntos de voltaje neutro se desplacen apreciablemente con respecto a la posición de las escobillas. En consecuencia, la función de conmutación del conmutador y las escobillas ya no está libre de producción de chispas, lo que hace que se reduzca mucho la vida del conmutador y de las escobillas.

2.10 Corrección del efecto de armadura.

Existen 4 formas principales de combatir el problema de la reacción de armadura.

1. Mover el mecanismo de sujeción de las escobillas a fin de hallar el punto neutro correcto. No obstante, es necesario mover las escobillas cada vez que cambia la corriente de la carga.
2. Conformar o modificar los extremos de las zapatas de los polos de campo de manera que no pueda haber flujos elevados en los extremos, debido a la alta reluctancia. Esto es lo que se acostumbra hacer en casi toda la maquinaria de corriente continua que se fabrica en la actualidad. Minimiza el problema sin eliminarlo.
3. Agregar polos de conmutación a la estructura del campo. En las máquinas de corriente continua más grandes, es decir, en aquellas con una potencia de 1 hp o 1 Kw hacia arriba, entre los polos principales del campo se colocan campos de conmutación, los cuales son más pequeños que los polos de campo principales pero se construyen en forma similar. Siempre se conectan en serie con la armadura. Operan modificando localmente la resultante de los campos magnéticos que producen la armadura y los polos del campo principal.

4. La última de las formas de control de la reacción de armadura, consiste en los devanados de compensación. En las unidades más grandes de uso pesado puede encontrarse un devanado de compensación, el cual se instala en las caras de las zapatas de los polos de los campos principales. El devanado de compensación se requiere, además de los campos de conmutación, con el objeto de que el proceso de conmutación este libre de chispas cuando circulen corrientes muy altas o bien en condiciones transitorias.

2.11 Construcción mecánica de la máquina de cd.

Para construir una estructura magnética efectiva que permita el movimiento rotatorio, el motor se configura alrededor de un apilamiento cilíndrico de discos hechos de una aleación magnética que se sujetan a presión o mediante seguros a un eje. A esta estructura magnética rotatoria o armadura, se le hace luego perforaciones o ranuras con el propósito de dejar espacio para las bobinas que se montaran en ella.

Los polos magnéticos ante los que pasarán los conductores durante el movimiento rotatorio deben por consiguiente estar orientados hacia adentro, hacia la superficie cilíndrica de la estructura rotatoria. De hecho las caras de los polos son curvas que se adaptan, por lo menos en parte, a la forma rotatoria. Como una línea de fuerza magnética es una trayectoria cerrada, debe existir un camino de retorno entre los extremos exteriores y los polos magnéticos. Esta función la desempeña la pesada estructura de la carcasa. La figura 2-8 muestra la estructura magnética de un motor o generador.

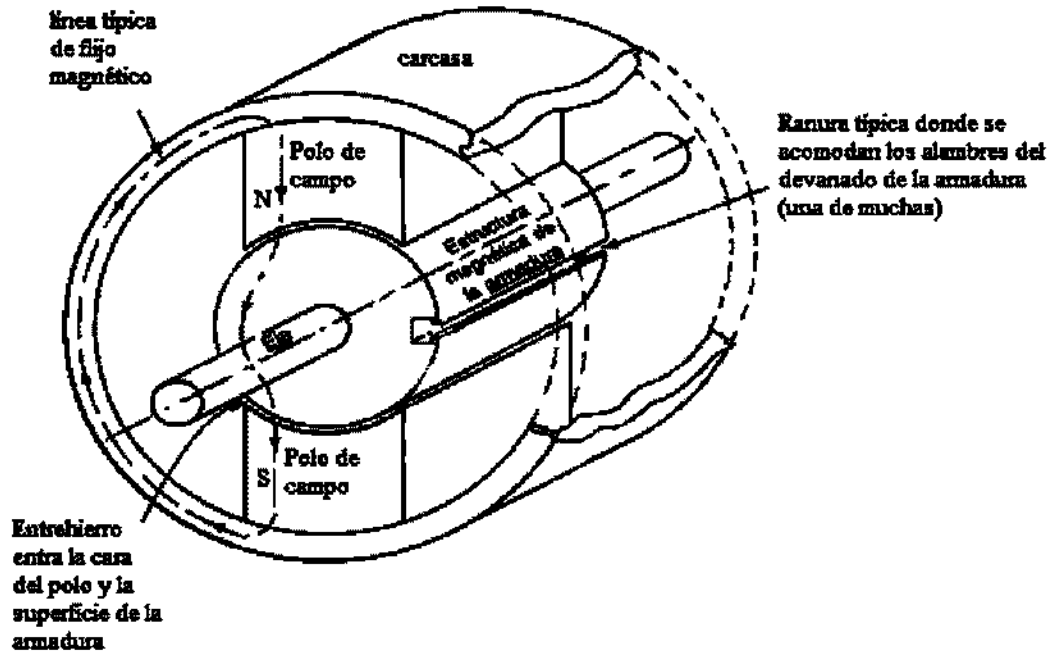


Fig. 2-8 Estructura magnética de un motor o generador de cd.

Por lo general el campo magnético lo proporciona un conjunto de bobinas de campo de muchas vueltas que rodean a los polos de campo en el espacio que hay entre la armadura y la carcasa. Estas bobinas pueden ser de varios tipos, dependiendo de la procedencia de las corrientes requeridas.

Los devanados de la armadura se hallan montados o tejidos en las ranuras de la estructura magnética. Independientemente de cuantas bobinas y vueltas por bobina haya, debe haber el espacio suficiente para acomodarlas. Se infiere entonces que, ya sea por una gran corriente que requiera una sección transversal grande, o a un voltaje muy elevado que requiera muchas vueltas, el tamaño físico de la armadura está determinado por las dimensiones de los devanados que debe contener.

2.12 Generador elemental.

Los voltajes que se generan en un conductor individual varían en polaridad ya que primero pasan por un polo norte y luego por un polo sur de acuerdo con la regla de Fleming de la mano derecha. En el instante que se muestra en la figura 2-9, cada uno de los

conductores de la bobina de una sola vuelta se está moviendo en ángulo recto con respecto al campo magnético. En este caso para un generador elemental puede suponerse que todo el espacio que hay entre los polos norte y sur magnéticos está lleno con un campo magnético uniforme. Para esa situación la regla de Fleming muestra que el conductor de la derecha está generando una fuerza electromotriz que hace que la corriente entre a la página; con el conductor de la izquierda ocurre lo contrario.

Estos dos voltajes de dirección opuesta están en realidad conectados en serie mediante la conexión que se ve en la parte trasera y además por cualquier circuito externo que se halle conectado entre los dos extremos marcados con + y -.

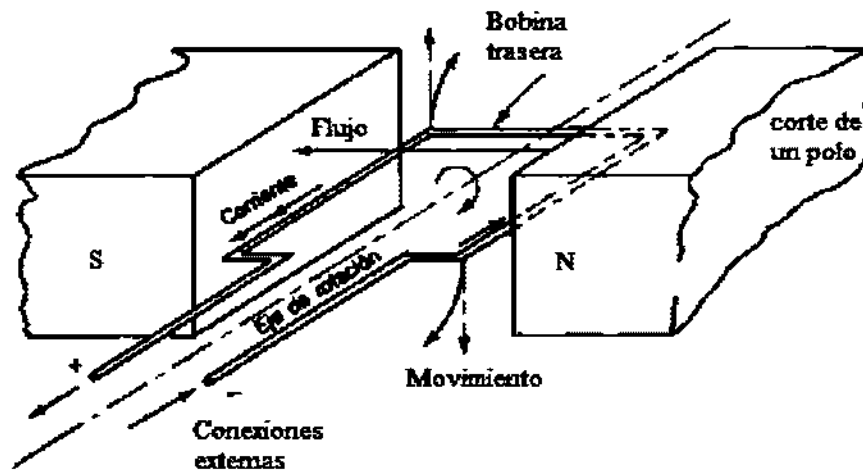


Fig. 2-9 Generador elemental.

Si se observa la figura 2-10a se podrá ver que al cabo de una rotación de 90° la bobina de una sola vuelta se encuentra paralela al campo magnético uniforme. En esa posición la bobina no corta, por un instante, ningún enlace magnético y por tanto no genera ningún voltaje. En el próximo cuarto de 90° de movimiento la bobina invierte la situación y el voltaje inducido tiene una polaridad opuesta a la de la situación original que se ve en la figura 2-9.

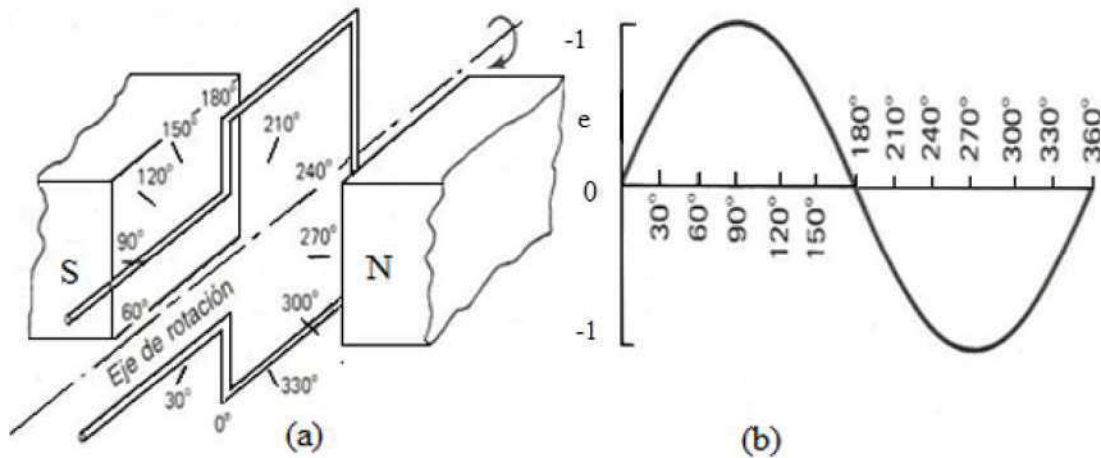


Fig. 2-10 (a) Posiciones angulares instantáneas (b) Voltaje generado contra posición angular.

En la gráfica 2-10b se muestra un generador elemental o idealizado en el que un campo uniforme fluye de polo a polo. En este caso el voltaje en cualquier espira tiene una variación senoidal. Esta generación de una corriente alterna (ca) sí ocurre en las máquinas prácticas, aun cuando la forma de onda no sea exactamente una onda senoidal, ya que el campo magnético no fluye en líneas rectas entre 2 polos alejados uno del otro.

La rectificación de este voltaje de corriente alterna (ca) se lleva a cabo en forma sencilla por el conmutador, el cual es sólo un interruptor mecánico rotatorio que se compone de segmentos aislados (entre sí) conectados a los extremos de las bobinas. Unas escobillas fijas se disponen de modo que estén en contacto con los segmentos del conmutador (o delgas), como se ve en la figura 2-11.

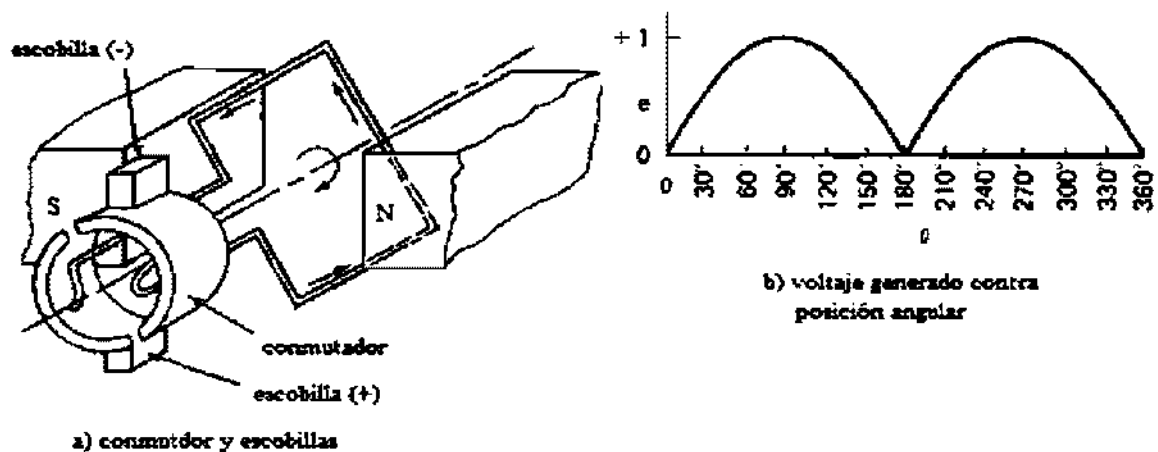


Fig 2-11 Voltaje generado contra posición angular (basado en lo mismo que la figura 2-10a y 2-10b)

CAPÍTULO 3

Operación de la Máquina de corriente directa operando como Motor.

3.1 Introducción.

El motor de cd juega un papel de importancia creciente en la industria moderna porque puede operar a cualquier velocidad desde cero hasta su máximo régimen y mantenerse ahí de forma muy precisa. Por ejemplo, algunos de los motores de los automóviles son de corriente directa desde la marcha hasta el calefactor/desempañador. Muchos tienen asientos, ventanillas y limpiaparabrisas, todos estos accionados por motores de cd.

Continuamente se hacen investigaciones sobre el motor de tracción de cd para ferrocarriles, en la actualidad la mayor parte de ellos mueve las ruedas mediante motores de tracción de cd. Si se investiga hasta llegar a fondo, resulta que casi todos los trenes y automóviles de transporte rápido son movidos por motores de cd. Es entonces muy evidente que los técnicos e ingenieros modernos deben procurar entender estos tipos de motores flexibles y eficientes.

La máquina de cd está constituida principalmente por dos devanados, el devanado de armadura (rotor) y el devanado de campo (estator). Una parte importante de esta máquina es el conmutador o bien rectificador. Las máquinas de cd incluyen un devanado que lleva corriente directa y se utiliza para producir el flujo principal de operación en la máquina, este devanado se llama de excitación y se localiza en el estator. El devanado del rotor puede ser intrincado o distribuido. Para que la máquina de cd pueda operar, es necesario que circule una corriente por el devanado del rotor y el estator debe producir un campo magnético giratorio.

Los motores de cd son, claro está, accionados por una fuente de potencia cd. A menos que se especifique otra cosa, se asume que el voltaje de entrada es constante, puesto que esta suposición simplifica el análisis de los motores y la comparación entre los diferentes tipos de ellos. Existen 4 clases principales de motores de cd de uso general:

1. El motor de cd de excitación separada.
2. El motor cd con excitación en derivación.
3. El motor cd serie.
4. El motor cd compuesto.

Cada uno de estos tipos de motor de cd se examinará por separado.

3.2 Regulación de velocidad en motores de cd.

Los motores de cd se comparan entre sí frecuentemente por sus regulaciones de velocidad. La regulación de velocidad es una medida aproximada de la forma de la característica par-velocidad de un motor, una regulación de velocidad positiva significa que la velocidad del motor cd disminuye con el aumento de carga y una regulación negativa de velocidad significa que la velocidad aumenta cuando aumenta la carga. La magnitud de la regulación de velocidad dice, aproximadamente, qué tan empinada es la pendiente de la curva par-velocidad.

La regulación de velocidad (SR) de un motor se define como:

$$SR = \frac{n_v - n_{p\ c}}{n_{p\ c}} * 100\% \quad 3-1$$

Donde:

n_v Es la velocidad en RPM del motor cd en vacío.

$n_{p\ c}$ Es la velocidad en RPM del motor cd a plena carga.

3.3 Ecuación de voltaje inducido (E_a) y par generado del motor de cd.

El voltaje interno generado en el motor o generador cd está relacionado con la ecuación 3-2.

$$E_a = K\phi n \quad 3-2$$

Donde:

E_a Es el voltaje interno generado expresado en volts.

ϕ Es el flujo de campo magnético expresado en líneas por pulgada cuadrada, o en webers por metro cuadrado

n La velocidad en RPM del rotor de la máquina.

K Constante que depende de la construcción de la máquina. $K = \frac{ZP}{60a}$ y está determinado por muchos factores como número de conductores (Z), polos de campo (P) y de trayectorias de corriente en el devanado de armadura (a) y por tanto son parámetros de diseño y en consecuencia son cantidades fijas.

La ecuación para el par inducido se relaciona con la ecuación 3-3.

$$\tau_{ind} = K \phi I_a \quad 3-3$$

Donde:

τ_{ind} El par desarrollado por el motor expresado en [N m]

ϕ El flujo magnético en la máquina en líneas por pulgada cuadrada, o en webers por metro cuadrado.

I_a La corriente de armadura en la máquina en Amperes.

K Una constante que depende de la construcción de la máquina.

Estas dos ecuaciones corresponden a la Ley de Voltajes de Kirchhoff del circuito de la armadura y junto con la curva de magnetización de la máquina son herramientas necesarias para analizar el comportamiento y el funcionamiento de un motor cd.

3.4 Curva de saturación de la máquina de cd.

Las características presentes en las máquinas eléctricas dependen en gran medida de la aplicación de los materiales magnéticos. Los materiales magnéticos son algo menos que ideales, al incrementar su flujo se da lugar a la saturación, con la consecuencia de que su capacidad de permeabilidad magnética comienza a decrecer, además de la carencia de efectividad al contribuir con la densidad de flujo total en la máquina.

Tanto el par inducido $\tau_{ind} = K \Phi I_a$, como el voltaje generado $E_a = K \Phi n$, en todas las máquinas dependen de las reluctancias de las porciones de hierro de los circuitos magnéticos y de los entrehierros. Por consiguiente, la saturación afecta de manera considerable las características que presentan las máquinas.

El voltaje interno generado (E_a) de un motor está dado por:

$$E_a = K \Phi n \quad 3-4$$

En consecuencia, (E_a) es directamente proporcional al flujo en la máquina y a la velocidad de rotación de ella. La corriente de campo en una máquina cd produce una fuerza magnetomotriz de campo dada por $\mathcal{F} = N_F I_F$ la cual produce un flujo en la máquina de acuerdo con la curva de magnetización. Puesto que la corriente de campo es directamente proporcional a la fuerza magnetomotriz y (E_a) es directamente proporcional al flujo, es costumbre presentar la curva de magnetización como una gráfica de (E_a) contra la corriente de campo a una velocidad dada.

Las características de saturación de las máquinas de rotación generalmente se presentan en forma de una característica de circuito abierto, también denominado curva de magnetización o de saturación, como se muestra en la figura 3-1.

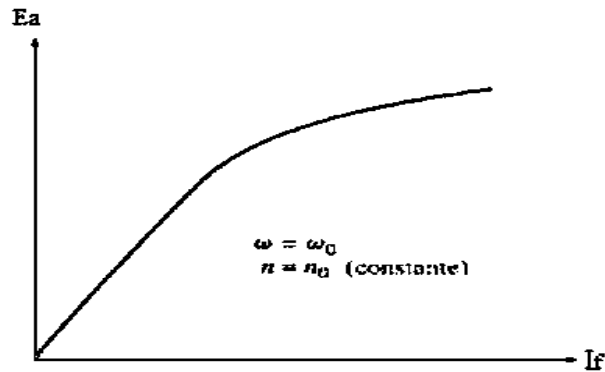


Fig 3-1 Curva de magnetización de una máquina de cd.

3.5 Relación fuerza, trabajo y potencia.

Muchas veces se hace fácil relacionar la potencia eléctrica en watts con la potencia mecánica rotatoria en caballos de fuerza (HP). Por lo general es que esto se debe a que uno o ambos tipos de potencia no son conceptos perfectamente entendidos. La raíz de la dificultad parece estar en la distinción científica que debe haber entre los conceptos de fuerza, trabajo y potencia.

3.5.1 Fuerza.

La fuerza es una tendencia a causar movimiento, como la presión sobre una superficie, la tensión en un cable o la atracción de un imán. En realidad no es necesario que genere movimiento para hacer fuerza. Ésta se mide en dinas en el sistema cgs, en libras en el sistema inglés y en newtons en el SI. Las equivalencias entre estas unidades se muestran en la tabla 3-1.

Unidades de fuerza.	
Sistema inglés	Sistema SI
1 libra (lb)	4.4482 newtons (N)
0.22481 lb	1 newton (N)

Tabla 3-1 Relación de unidades de fuerza.

3.5.2 Trabajo.

El trabajo es una fuerza ejercida a lo largo de una distancia. Al considerar mecánicamente el trabajo debe ocurrir un movimiento, como en un motor eléctrico. La unidad del sistema cgs del trabajo es el ergio o dina-centímetro. En el sistema inglés se emplea la libra-pie (lb-ft) y en el sistema SI se utiliza el newton-metro, que también recibe el nombre de Joule (J). la equivalencia entre unidades se indica en la tabla 3-2.

Unidades de trabajo.	
Sistema inglés	Sistema SI
1 ft-lb	1.355 newton-metro
0.7375 ft-lb	1 newton-metro

Tabla 3-2 Relación de unidades de trabajo.

3.5.3 Potencia.

El concepto de potencia es simplemente la rapidez con la que se hace un trabajo. Por razones históricas las unidades inglesas de potencia no son sólo la libra-pie por segundo o por minuto. La unidad original de potencia se obtuvo a partir del cálculo del caballo de fuerza (hp) hecho por James Watt. James Watt definió un hp como 550 lb-ft/s o 33000 lb-ft/min. Como se ve en la tabla 3-3.

Unidades de potencia.		
Sistema inglés	Sistema SI	
$1 \frac{ft-lb}{seg}$	$1.3558 \frac{N-m}{s}$	1.3558 W
$550 \frac{ft-lb}{seg}$	$745.70 \frac{N-m}{s}$	745.70 W
$0.73755 \frac{ft-lb}{seg}$	$1 \frac{N-m}{s}$	1 W
$735.55 \frac{ft-lb}{seg}$	$10^3 \frac{N-m}{s}$	1 KW

Tabla 3-3 Relación de unidades de potencia.

3.6 Pérdidas y eficiencia del motor de cd.

En la eficiencia de un motor cd se deben determinar las siguientes pérdidas.

1. Pérdidas eléctricas o en el cobre.
2. Pérdidas por caídas en las escobillas.
3. Pérdidas mecánicas.
4. Pérdidas en el núcleo.
5. Pérdidas misceláneas.

Para explicar las pérdidas de potencia en un motor de cd se utiliza un diagrama de flujos de potencia. La figura 3-2 nos muestra éste tipo de diagrama:

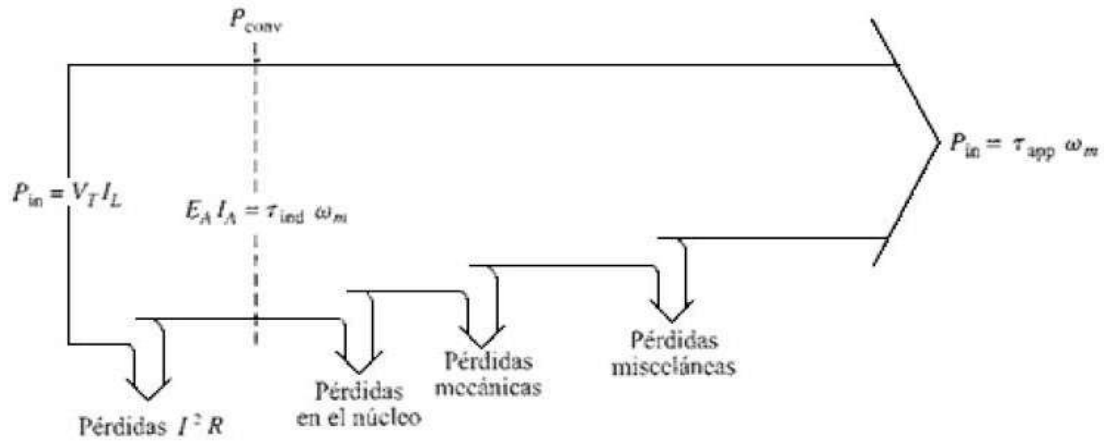


Fig 3-2 Diagrama de flujo de potencia para un motor CD.

Se puede observar que se suministra potencia eléctrica a la máquina, después se restan las pérdidas eléctricas $I^2 R$, y después de restar esas pérdidas eléctricas se convierte la potencia eléctrica en potencia mecánica en el punto indicado P_{conv} . La potencia eléctrica convertida está dada por:

$$P_{conv} = E_A I_A \quad 3-5$$

Y la potencia mecánica resultante está dada por:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad 3-6$$

Sin embargo ésta no es la potencia mecánica que aparece en las terminales de la máquina. Antes de alcanzar las terminales de la máquina deben restarse las pérdidas en el núcleo, las pérdidas mecánicas y las pérdidas misceláneas.

- **Pérdidas eléctricas o en el cobre.**

Equivalen a las pérdidas $I^2 R$ en los devanados de armadura y de campo. Estas pérdidas se pueden encontrar conociendo las corrientes en la máquina y las dos resistencias.

- **Pérdidas por caída en las escobillas.**

Se aproximan con frecuencia agrupándolas con las pérdidas en el cobre. Las pérdidas por caída en las escobillas son justamente el producto del voltaje de caída en las escobillas (V_{BD}) por la corriente de armadura (I_a).

$$P_{esc} = V_{BD} I_a \quad 3-7$$

- **Pérdidas en el núcleo y las pérdidas mecánicas.**

Las pérdidas en el núcleo y las pérdidas mecánicas se determinan en conjunto. Si se deja girar libremente un motor en vacío a la velocidad nominal, entonces no hay potencia de salida de la máquina. Puesto que el motor está sin carga, I_a es muy pequeña y las pérdidas en el cobre de la armadura son despreciables.

- **Pérdidas dispersas (o pérdidas misceláneas).**

Las pérdidas dispersas son aquellas que no se pueden clasificar en algunas de las categorías indicadas anteriormente. No tiene importancia el cuidado con el que se contabilicen las pérdidas, pues casi siempre algunas quedan por fuera de las categorías mencionadas. Todas esas pérdidas se reúnen en las pérdidas misceláneas. Para la mayoría de las máquinas, las pérdidas misceláneas se toman convencionalmente como el 1% de la plena carga (potencia de entrada).

La eficiencia (n) de cualquier dispositivo, como un motor o un generador, es sólo su potencia de salida dividida entre su potencia de entrada cuando están dadas en las mismas unidades. La potencia de salida (P_{out}) es la potencia de entrada (P_{in}) menos las diversas pérdidas acumuladas. De manera similar, la entrada es la potencia de salida más las mismas pérdidas. La eficiencia se formula como sigue:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad 3-8$$

Donde:

$$P_{out} = P_{in} - \Sigma \text{pérdidas} \quad 3-9$$

$$P_{in} = P_{out} + \Sigma \text{pérdidas} \quad 3-10$$

Como consecuencia cualquiera de las dos relaciones que siguen se cumplen en los casos en que se puede ser más fácil medir la salida o la entrada.

$$n = \frac{P_{in} - \Sigma \text{pérdidas}}{P_{in}} * 100\% \quad 3-11$$

$$n = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma \text{pérdidas}} * 100\% \quad 3-12$$

La eficiencia de una máquina de cd se define por:

$$\text{Potencia de salida } (P_{out}) = P_{in} - P_{esc} - P_{cu} - P_{nucleo} - P_{mec} - P_{misc} \quad 3-13$$

Donde:

P_{in} Potencia de entrada en watts.

P_{esc} Pérdidas en escobillas en watts.

P_{cu} Pérdidas en el cobre en watts.

P_{nucleo} Pérdidas en el núcleo en watts.

P_{mec} Pérdidas mecánicas en watts.

P_{misc} Pérdidas misceláneas en watts.

$$\text{Potencia de entrada } (P_{int}) = (V_{nom})(I_{nom}) \quad 3-14$$

Donde:

V_{nom} Voltaje nominal.

I_{nom} Corriente nominal.

Finalmente la ecuación para calcular la eficiencia de la máquina es:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad 3-15$$

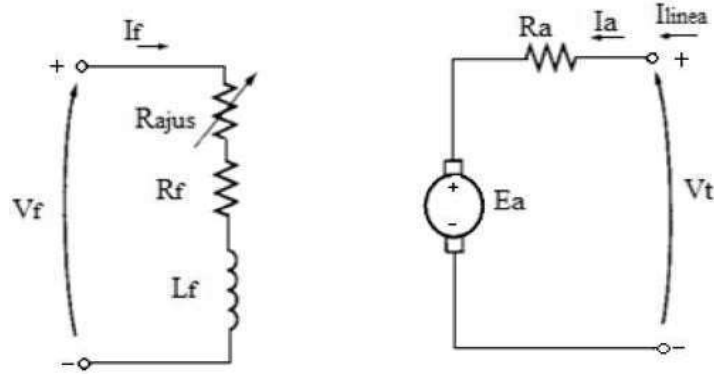
La diferencia entre la potencia de entrada y la de salida de la máquina son las pérdidas que ocurren en su interior.

3.7 Motor cd con excitación separada y shunt (Derivación).

Un motor cd con excitación independiente es un motor cuyo circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia separada de voltaje constante, mientras que un motor dc en derivación es aquel cuyo circuito de campo obtiene su potencia directamente de las terminales de la armadura del motor. Si se supone que el voltaje de alimentación al motor es constante, no hay diferencia de comportamiento entre estas dos máquinas. A menos que se especifique lo contrario, siempre que se describe el comportamiento de un motor en derivación, también se incluye el motor de excitación separada.

En la figura 3-3 se muestra el circuito equivalente de un motor cd con excitación independiente. La ecuación 3-16 corresponde a la ley de voltajes de Kirchhoff (KVL) para el circuito del inducido de estos motores es:

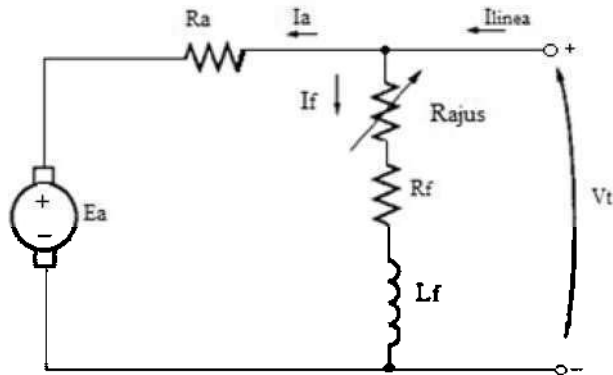
$$V_t = E_a + I_a R_a \quad 3-16$$



$$V_t = E_a + I_a R_a \quad I_f = \frac{V_f}{R_f} \quad I_{linea} = I_a$$

Fig. 3-3 Circuito equivalente de un motor de cd en excitación independiente.

La figura 3-4 muestra el circuito equivalente de un motor dc en derivación



$$V_t = E_a + I_a R_a \quad I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad I_{linea} = I_a + I_f$$

Fig. 3-4 Circuito equivalente de un motor cd shunt.

3.7.1 Comportamiento en terminales de un motor en shunt.

Una característica en las terminales de una máquina es una gráfica de las cantidades de salida de la máquina contra cada una de las demás. En un motor las cantidades de salida son el par del eje y la velocidad; por tanto, su característica en las terminales es una gráfica del par (τ) contra la velocidad de salida (n).

¿Cómo responde un motor dc en derivación a una carga? Suponga que aumenta la carga en el eje del motor; entonces el par de la carga (τ_{carga}) excederá el par inducido (τ_{ind}) en la máquina, y el motor comenzará a reducir la velocidad. Cuando el motor se frena, su voltaje interno generado ($E_g = K\phi n$) disminuye y la corriente de armadura (I_a) del motor aumenta. Cuando aumenta la corriente de armadura (I_a), aumenta el par inducido (τ_{ind}) y finalmente, el par inducido igualará al de carga a una velocidad mecánica de rotación más baja.

La característica de salida de un motor cd en derivación se puede deducir la ecuación de voltaje inducido y del par del motor, junto con la ecuación correspondiente a la ley de voltajes de Kirchhoff. Esta última ecuación, aplicada al motor en derivación es:

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad 3-17$$

El voltaje inducido ($E_a = K\phi n$) tal que:

$$V_t = K\phi n + I_a R_a \quad 3-18$$

Puesto que $\tau_{ind} = K \phi I_a$, la corriente I_a puede ser expresada como:

$$I_a = \frac{\tau_{ind}}{K \phi} \quad 3-19$$

Combinando las ecuaciones se obtiene:

$$V_t = K\phi n + \frac{\tau_{ind}}{K \phi} R_a \quad 3-20$$

Finalmente, despejando la velocidad del motor se tiene:

$$n = \frac{V_t}{K \phi} - \frac{R_a}{(K \phi)^2} \tau_{ind} \quad 3-21$$

Esta ecuación representa justamente una línea recta con pendiente negativa. La característica resultante par-velocidad de un motor cd en derivación se muestra en la figura 3-5.

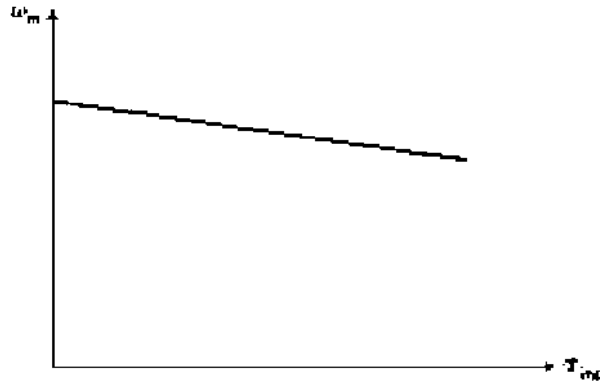


Fig. 3-5 Característica par-velocidad del motor cd en conexión separada y shunt.

La reacción de armadura es otro efecto interno del motor que también puede afectar la forma de la curva par-velocidad. Si un motor presenta reacción de armadura, el efecto de debilitamiento del flujo reduce el efecto en la máquina a medida que aumenta la carga. Como muestra la ecuación 3-21 la reducción del flujo aumenta la velocidad del motor, a cualquier carga dada, más allá de la velocidad a que podría girar si no se presentara la reacción de armadura.

La figura 3-6 muestra la característica par-velocidad de un motor en derivación con reacción de armadura. Si un motor tiene devanados de compensación, es claro que no se presentarán los problemas de debilitamiento de flujo en la máquina, y éste será constante.

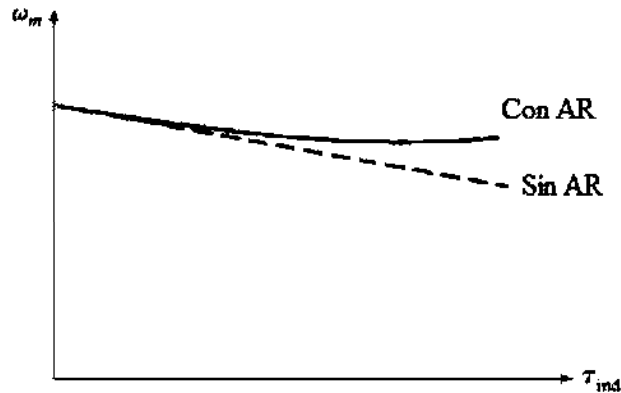


Fig. 3-6 Característica par-velocidad del motor cd con reacción de armadura.

3.7.2 Control de velocidad en motores con excitación separada y shunt.

Existen dos métodos para controlar la velocidad en motores con excitación separada y shunt los cuales son: por cambio en la resistencia del devanado de campo y por cambio en el voltaje en la armadura.

3.7.2.1 Cambio de reóstato de campo.

Para entender qué ocurre cuando se cambia la resistencia de campo de un motor cd, supóngase que se introduce un reóstato de campo (R_{ajuste}) y por medio de éste reóstato incrementamos la resistencia de campo y veamos que sucede. De acuerdo con $n = \frac{V_t}{K \Phi}$, también podemos variar (n), variando el flujo (Φ). Ahora mantengamos constante V_t y la velocidad cambiará en proporción inversa al flujo (Φ). La figura 3-7 nos muestra el diagrama.

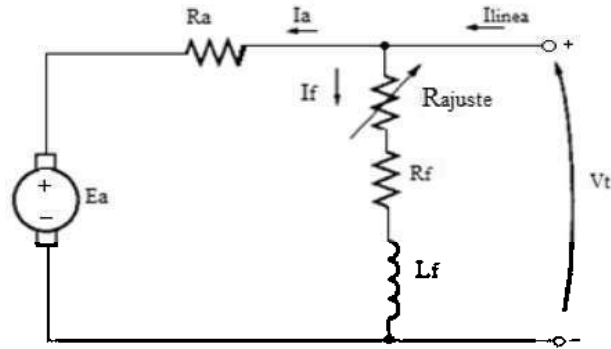


Fig. 3-7 Control de la corriente de campo de un motor en conexión shunt por medio del reóstato de campo.

Si incrementamos súbitamente la resistencia del reóstato, entonces la corriente de campo disminuye y el flujo de campo también disminuye con ella. Esto reduce de inmediato la fuerza contraelectromotriz ($E_a = K\phi n$), causando así que la corriente de armadura (I_a) tenga un valor mucho más alto. La corriente cambia drásticamente porque su valor depende de la pequeña diferencia entre V_t y E_a . A pesar del campo más débil, el motor desarrolla un par mayor que antes, acelerará hasta que E_a sea de nuevo casi igual que V_t . Obviamente para desarrollar el mismo E_a con un flujo más débil, el motor debe girar más rápido.

3.7.2.2 Cambio de voltaje en la armadura.

La segunda forma de controlar la velocidad implica el cambio de voltaje aplicado a la armadura del motor sin cambiar el voltaje aplicado al campo. Para realizar este tipo de control, se requiere una conexión similar a la de la figura 3-8. En efecto el motor debe de estar en conexión de excitación independiente para utilizar el control de voltaje por medio de la armadura.

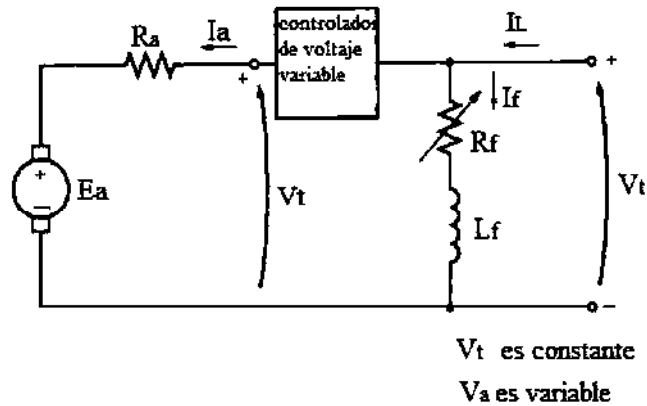


Fig. 3-8 Control de voltaje de la armadura de un motor shunt.

Si el voltaje V_a aumenta, se debe aumentar la corriente de armadura (I_a) en el motor. Como la corriente de armadura aumenta, el par inducido ($\tau_{ind} = K \phi I_a$) aumenta, de modo que $\tau_{ind} > \tau_{carga}$ y la velocidad (n) del motor aumenta.

Como la velocidad (n) aumenta, el voltaje interno generado ($\tau_{ind} = K \phi I_a$) aumenta causando una disminución en la corriente de armadura. Esta disminución en la corriente de armadura (I_a) reduce el par inducido y ocasiona que este τ_{ind} iguale al par de la carga (τ_{carga}) a una mayor velocidad de rotación.

3.7.3 Obtención experimental de la curva de saturación de la máquina de corriente directa.

La máquina de cd del laboratorio con la cual se trabajó y se realizaron todas las pruebas en las diferentes conexiones como motor, tiene los siguientes datos nominales de placa a plena carga: 175 watts-1800 RPM-120 V-2.8 Amp. Ésta máquina presenta una resistencia en el devanado shunt y serie respectivamente de $278 \, \Omega$ y $1.6 \, \Omega$, los cuales fueron medidos directamente en las terminales de dichos devanados por medio de un óhmetro. La resistencia del devanado de armadura es de $14.9 \, \Omega$ y se obtuvo mediante una prueba llamada Resistencia Dinámica.

Por otra parte, la máquina que permite aplicarle carga mecánica a la máquina de cd en todas las conexiones eléctricas se hace con un electrodinamómetro.

Primero se determinará la posición neutra de las escobillas para que la máquina se encuentre en sus mejores condiciones y obtener las mediciones más exactas posibles.

Esto se hace aplicando un voltaje fijo de 20 Vca al devanado shunt de la máquina de cd y midiendo el voltaje que se induce en las terminales de la armadura con un voltímetro, ahora lo que sigue es mover la posición de las escobillas de modo que el voltaje que aparezca en el voltímetro sea el menor posible, dejando fijas las escobillas en ese punto.

Ahora para obtener la curva de saturación de la máquina de cd, la prueba se hace en condiciones de vacío. Se hace girar la máquina de cd a una velocidad constante de 1800 RPM mediante una máquina síncrona y aplicando un voltaje variable de cd al devanado shunt de la máquina, censando la corriente de campo en dicho devanado junto con el voltaje inducido que aparece en las terminales de la armadura. Por lo tanto la curva de saturación para la máquina depende de la corriente de excitación en el devanado shunt y del voltaje inducido en las terminales de la armadura. La tabla 3-4 muestra las mediciones obtenidas en la prueba.

I_f (A)	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
V_t (V)	2.8	21.1	40	65.4	84	104.6	121	131.5	143.5	150.7	157.4	162	166.6	168	169

Tabla 3-4 Datos obtenidos en la prueba de saturación.

Y en la figura 3-9 se muestra la curva característica de saturación de la máquina, obtenida experimentalmente que depende de la corriente de excitación y del voltaje que aparece en las terminales de la armadura. Todas las figuras siguientes de las curvas obtenidas experimentalmente para cada una de las diferentes conexiones mostradas en éste trabajo de tesis, están realizadas usando la herramienta MATLAB.

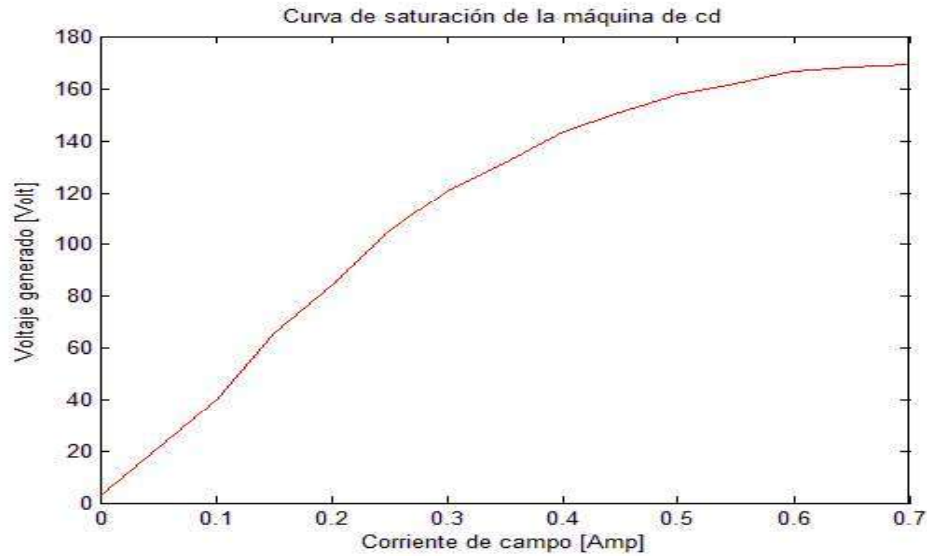


Fig 3-9 Curva de saturación.

3.7.4 Características experimentales del comportamiento del motor en excitación independiente.

La máquina de cd se energiza y estando acoplada al electrodinamómetro por medio de una banda, se empieza a aplicar un par electromecánico desde par 0 hasta un par que provoque una elevación mayor a las condiciones nominales de corrientes de placa en el devanado de armadura de la máquina de cd, para obtener una gráfica más completa. Los parámetros obtenidos en la máquina de cd en la conexión excitación independiente son corriente de campo (I_f), corriente de línea o armadura (I_a), el par de carga aplicado al eje del motor (τ_{carga}) y la velocidad de rotación (ω) en RPM del eje, manteniendo un voltaje fijo de 120 Vcd aplicado en las terminales del motor para cada carga dada. La tabla 3-5 muestra los resultados obtenidos en la conexión independiente.

τ_{carga} (Lbf-in)	I_a (A)	I_f (A)	ω (RPM)	V_t (V)
0	0.87	0.18	2266	120
1	1.10	0.18	2170	120
2	1.33	0.18	2102	120
3	1.55	0.18	2048	120
4	1.80	0.18	1976	120
5	2.03	0.18	1919	120
6	2.26	0.18	1883	120
7	2.55	0.18	1834	120
8	2.8	0.18	1800	120
9	3.12	0.18	1740	120
10	3.44	0.18	1713	120
11	4.27	0.18	1634	120

Tabla 3-5 Resultados obtenidos en la conexión independiente.

En la tabla 3-5 se observa que en condiciones de vacío se presenta la mínima corriente de línea y que ésta comienza a aumentar conforme se le aplica carga al eje del motor, siendo el valor de 8 Lbf-in el valor nominal de carga del motor y aplicando un par máximo con un valor de 11 Lbf-in para fines de prueba. Puesto que la excitación es independiente, la corriente de campo permanecerá constante para cualquier carga aplicada al motor. La característica par-velocidad de los motores de cd es la propiedad más importante ya que esta nos muestra el comportamiento del motor conforme se le aplican diferentes cargas, en la figura 3-10 se muestra ésta característica de acuerdo con los valores obtenidos en la prueba para el motor con excitación independiente.

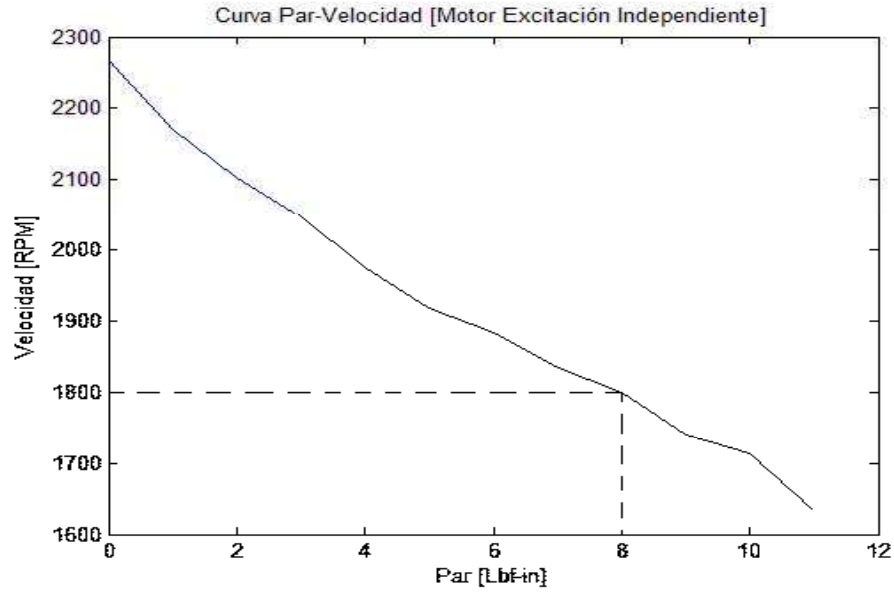


Fig. 3-10 Característica par-velocidad, conexión independiente.

En la tabla 3-5 y en la figura 3-10, se observa que se alcanza la corriente nominal en el devanado de excitación cuando se le aplica un par igual a 8 lbf-in , a su velocidad nominal de 1800 RPM. Ahora en estas condiciones nominales, se puede conocer de la tabla 3-5, la regulación de velocidad, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina.

$$\text{Regulación de velocidad} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{2266 - 1800}{1800} * 100 = 25\%$$

Esta regulación de velocidad de 25% indica que se presenta una disminución considerable de velocidad en el motor, de pasar de sus condiciones de vacío a su condición de plena carga. Ahora la potencia de entrada y de salida respectivamente son:

$$P_{in} = I_a V_t = (2.8A)(120V) = 336 \text{ watts}$$

$$P_{out} = \frac{(\text{Par})(\text{velocidad})(1.59)}{100,000} = \frac{(8\text{ lbf-in})(1800 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} = 170 \text{ watts}$$

Ya conociendo la potencia de entrada y salida se pueden conocer las pérdidas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 336\text{w} - 170\text{w} = 166 \text{ watts}$$

Se observa que las pérdidas obtenidas son grandes, y que un valor considerable de potencia de entrada se pierde en el interior de la máquina, estas pérdidas son debidas a la fricción, calentamiento y pérdidas en el cobre de los devanados.

Para conocer parte de las pérdidas presentadas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 3-5 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado de campo: } P_f = i_f^2 R_f = (0.18a)^2 (278\Omega) = 9 \text{ watts.}$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (2.8a)^2 (14.9\Omega) = 116.8 \text{ watts.}$$

Se observa que estas pérdidas obtenidas son de 125.8 *watts*, son grandes y por lo tanto se reflejarán en la eficiencia de la máquina. Como último dato la eficiencia de la máquina de cd en conexión independiente es.

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{170 \text{ watts}}{336 \text{ watts}} * 100 = 50\%$$

Ya que se presentan grandes pérdidas disipadas en la máquina, esto da como resultado una eficiencia del 50%, lo cual indica que la máquina no es tan eficiente en la conexión excitación independiente y por lo tanto no se le puede extraer toda su capacidad a la máquina de cd.

Otro dato muy importante es la corriente de arranque del motor en condiciones de plena carga, esto es, se pondrá en marcha el motor con un par de carga de *8lbf – in* el cual provoca que el motor se encuentre en sus condiciones nominales de operación de acuerdo con la Tabla 3-5.

$$I_{arranque} = 8.66 \text{ Amp}$$

Como es de esperarse es una corriente de arranque muy elevada, y es aproximadamente 3 veces mayor que la corriente nominal. Se debe ser cuidadoso con esta corriente ya que puede provocar una elevación de la temperatura en los devanados de la

maquina y dañar el aislamiento de dichos devanados. Mientras tanto el par de arranque que produce ésta corriente es de:

$$\tau_{arranque} = 27 \text{ lbf} - \text{in}$$

Es buen par de arranque y es característico del motor en la conexión de excitación independiente.

3.7.5 Características experimentales del comportamiento del motor shunt.

Para la conexión shunt (derivación) los parámetros obtenidos de la máquina son los mismos que en la conexión anterior: corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de línea (I_L), el par aplicado al eje del motor (τ_{carga}) y la velocidad de rotación (ω) en RPM del eje, todo esto manteniendo el voltaje aplicado de 120 Volts al motor. La tabla 3-6 muestra los resultados obtenidos en la conexión shunt.

τ_{carga} (Lbf-in)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
0	0.89	0.18	1.07	2266	120
1	1.13	0.18	1.30	2174	120
2	1.36	0.18	1.53	2100	120
3	1.58	0.18	1.75	2040	120
4	1.82	0.18	2	1970	120
5	2.03	0.18	2.21	1934	120
6	2.27	0.18	2.45	1900	120
7	2.54	0.18	2.7	1850	120

8	2.81	0.18	2.81	1800	120
9	3.19	0.18	3.36	1780	120
10	3.64	0.18	3.87	1716	120
11	4.05	0.18	4.32	1660	120

Tabla 3-6 Resultados obtenidos en la conexión shut.

De manera similar en la tabla 3-6 se aprecia que en condiciones de vacío existe una pequeña corriente de línea que circula en el devanado de campo y armadura. Mientras tanto la corriente de campo permanece constante para cualquier valor de carga aplicada. La corriente de línea tiende a aumentar conforme se aplica carga al eje del motor. El comportamiento de la característica par-velocidad para la conexión shunt de este motor se muestra en la figura 3-11, de acuerdo con los valores obtenidos en la prueba.

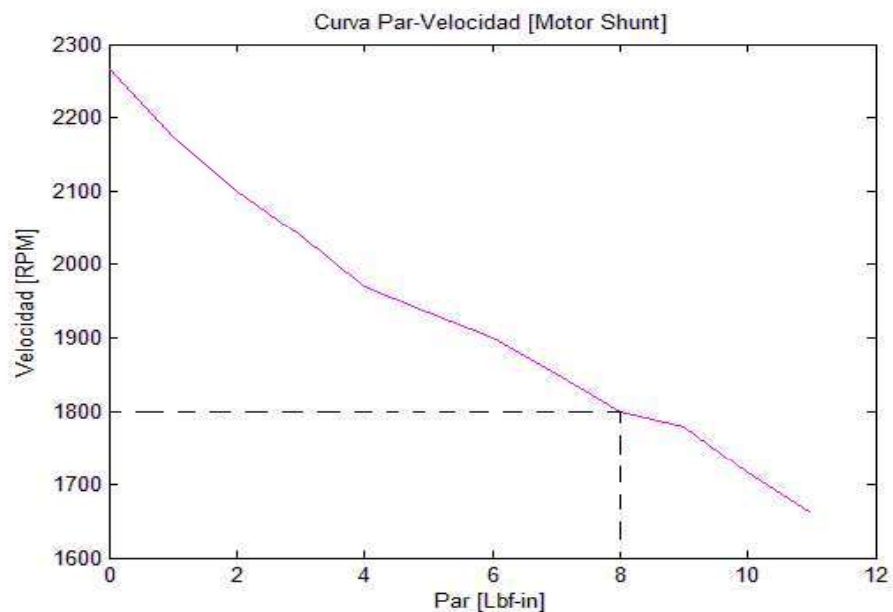


Fig. 3-11 Característica par-velocidad, conexión shunt.

De acuerdo con la tabla 3-6 y figura 3-11, se observa que se alcanzan las condiciones nominales de corriente de línea en la máquina cuando se le aplica al eje del motor un par igual a $8\text{ lbf} - \text{in}$, a su velocidad nominal de 1800 RPM. Ahora en estas

condiciones nominales, se conoce de la tabla 3-6, la regulación de velocidad, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina.

$$\text{Regulación de velocidad} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{2266 - 1800}{1800} = 25\%$$

Como se observa, esta caída de regulación de velocidad del 25% es la misma que en la conexión excitación independiente, presenta una diferencia apreciable entre su velocidad en vacío y a plena carga. Ahora la potencia de entrada y de salida:

$$P_{in} = I_L V_t = (2.81a)(120v) = 337.2 \text{ watts}$$

$$P_{out} = \frac{(\text{Par})(\text{velocidad})(1.59)}{100,000} = \frac{(8\text{ lbf-in})(1800 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} (746) = 170 \text{ watts}$$

Con estas potencias ya conocidas se pueden calcular las pérdidas generadas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 337.2\text{w} - 170.8\text{w} = 166.4 \text{ watts}$$

Conociendo las pérdidas obtenidas se observa que son grandes con respecto a su potencia nominal, y que mucha potencia de entrada se pierde en el interior de la máquina. Para conocer parte de las pérdidas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 3-6 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado de campo: } P_f = i_f^2 R_f = (0.18a)^2 (278\Omega) = 9 \text{ watts.}$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (2.81a)^2 (14.9\Omega) = 117.6 \text{ watts.}$$

Las pérdidas obtenidas son de 126.6 watts y por lo tanto se reflejarán en la eficiencia de la máquina en conexión shunt. Como último dato se conocerá la eficiencia de la máquina de cd en conexión shunt

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{170.8}{337.2} = 50\%$$

También en esta conexión shunt se presenta una baja eficiencia al igual que en la conexión independiente, debido a que la máquina presenta gran cantidad de pérdidas disipadas, esto da como resultado una eficiencia del 50%.

Otro dato importante es la corriente de arranque del motor en condiciones de plena carga, esto es, se pondrá en marcha el motor con un par de carga de $8\text{ lbf} - \text{in}$ el cual provoca que el motor se encuentre en sus condiciones nominales de operación de acuerdo con la Tabla 3-6.

$$i_{\text{arranque}} = 12.5a$$

Aquí la corriente de arranque es aproximadamente 5 veces mayor que la corriente a plena carga, esta corriente de arranque es mucho mayor que la corriente de arranque en la conexión excitación independiente. Se debe ser cuidadoso con esta corriente ya que provoca una elevación de temperatura en los devanados de la maquina y puede dañar el aislamiento en los devanados d la máquina. Mientras tanto el par de arranque que produce ésta corriente es de:

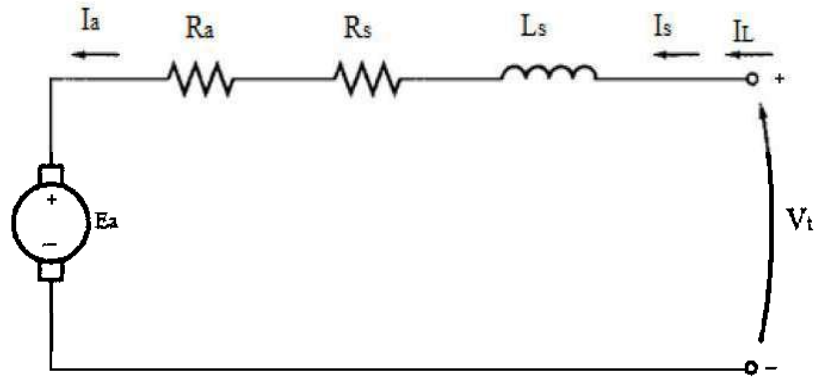
$$\tau_{\text{arranque}} = 4.2\text{ lbf} - \text{in}$$

Aquí tenemos un bajo par de arranque en comparación con la excitación independiente, y es la característica correspondiente para el motor en conexión shunt, no tienen tanto par de arranque.

3.8 Motor serie.

Un motor cd en conexión serie es un motor cuyo devanado de campo relativamente consta de pocas vueltas de alambre de una gran sección transversal para soportar una corriente a través de él muy grande, éste devanado de campo se encuentra conectado en serie con el circuito de la armadura como se muestra en la figura 3-12. En un motor serie la corriente de armadura (I_a), la corriente de campo (I_f) y la corriente de línea ($I_{\text{línea}}$) son iguales. En un motor serie el flujo por polo depende de la corriente de armadura (I_a) y por consiguiente de la carga. Cuando el motor serie arranca, la I_a es más alta que la normal, lo

que da por resultado que el flujo por polo también sea mayor que el normal. Se deduce entonces que el par de arranque de un motor en serie es mayor que el de un motor shunt.



$$I_a = I_s = I_{\text{linea}} \quad V_t = E_a + I_a(R_a + R_s)$$

Fig. 3-12 Circuito equivalente de un motor en conexión serie.

El campo más débil eleva la velocidad (n) del mismo modo que lo haría un motor shunt. Ya que la velocidad $n = \frac{V_t}{K \phi}$, disminuye cuando se reduce el flujo del campo serie. Por ejemplo si la corriente de carga de un motor serie cae a la mitad, el flujo disminuye a la mitad y por lo tanto su velocidad (n) se eleva.

La ecuación correspondiente a la ley de voltajes de Kirchhoff para motores es la siguiente:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_s) \quad 3-22$$

3. 8.1 Comportamiento en terminales de un motor cd en serie.

La característica en terminales de un motor dc serie es muy diferente de la del motor en derivación. El comportamiento básico de un motor cd serie se debe al hecho de que el flujo es directamente proporcional a la corriente de armadura (I_a) al menos hasta llegar a la saturación. Cuando se incrementa la carga del motor, también aumenta su flujo. Como se estudió al principio, un aumento en la carga del motor ocasiona una disminución en su

velocidad; el resultado es una caída drástica en la característica de par-velocidad de un motor en serie.

El par inducido de esta máquina está dado por la ecuación:

$$\tau_{ind} = K \phi I_a \quad 3-23$$

En esta máquina el flujo es directamente proporcional a la corriente de armadura (al menos hasta que el metal se sature). Entonces el flujo está dado por:

$$\phi = C I_a \quad 3-24$$

Donde C es una constante de proporcionalidad. Por lo tanto la ecuación 3-23 se convierte en:

$$\tau_{ind} = K C I_a^2 \quad 3-25$$

En otras palabras, el par en el motor es proporcional al cuadrado de la corriente de armadura. Como resultado de esta relación, es fácil observar que un motor serie produce más par por amperio que cualquier otro motor cd. El motor cd serie se utiliza en aplicaciones que requieren pares muy altos.

Ejemplos de tales aplicaciones son los motores de arranque en vehículos automotores, motores de elevadores y motores de tracción en locomotoras.

Para determinar la característica en las terminales de un motor cd serie, el análisis se basará en la premisa de que la curva de magnetización es lineal. Suponer que la curva de magnetización es lineal implica que el flujo en el motor será dado por la ecuación 3-26.

$$\phi = C I_a \quad 3-26$$

Esta ecuación se utilizará para deducir la curva característica par-velocidad del motor serie. La deducción de la característica par-velocidad de un motor serie comienza por aplicar la ley de voltajes de Kirchhoff:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_s) \quad 3-27$$

De la ecuación 3-25, la corriente de armadura puede expresarse como:

$$I_a = \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{KC}}$$

También, $E_a = K\Phi n$. Sustituyendo estas expresiones en la ecuación 3-27 se obtiene:

$$V_t = K\Phi n + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{KC}} (R_a + R_s) \quad 3-28$$

Si en esta expresión pudiera eliminarse el flujo, el par de un motor se relacionará directamente con su velocidad. Para eliminar el flujo en la expresión, nótese que:

$$I_a = \frac{\Phi}{C}$$

Y la ecuación de par inducido se puede escribir de nuevo como:

$$\tau_{ind} = \frac{K}{C} \Phi^2$$

En consecuencia, el flujo en el motor puede volverse a escribir como:

$$\Phi = \sqrt{\frac{C}{K}} \sqrt{\tau_{ind}} \quad 3-29$$

Finalmente sustituyendo la ecuación 3-29 en la ecuación 3-28 y resolviendo para la velocidad se obtiene:

$$V_t = K \sqrt{\frac{C}{K}} \sqrt{\tau_{ind}} n + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{KC}} (R_a + R_s)$$

$$\sqrt{KC} \sqrt{\tau_{ind}} n = V_t - \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{KC}} (R_a + R_s)$$

La relación par-velocidad resultante es:

$$n = \frac{V_t}{\sqrt{KC} \sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{(R_a + R_s)}{KC} \quad 3-30$$

Nótese que en un motor serie no saturado, la velocidad del motor varía con el inverso de la raíz cuadrada del par. ¡Esta relación es bastante inusual! Esta característica ideal par-velocidad se muestra en la figura 3-13.

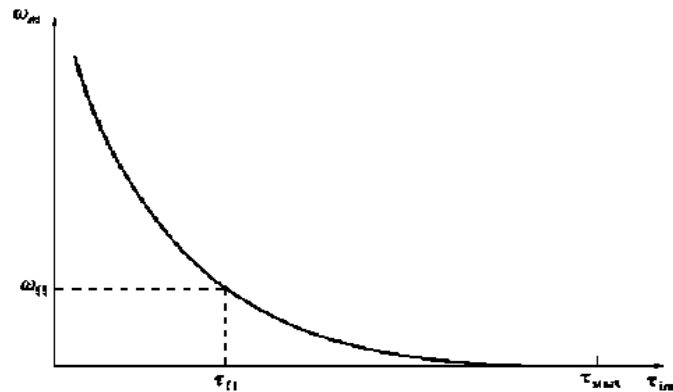


Fig. 3-13 Característica par-velocidad de un motor cd serie.

En la ecuación 3-30 se observa de inmediato una desventaja de los motores serie. Cuando el par de este motor tiende a cero, su velocidad tiene a infinito. En la práctica el par nunca puede llegar a cero debido a que es necesario contrarrestar las pérdidas mecánicas, en el núcleo y misceláneas. Sin embargo, si no se conecta otra carga al motor, éste puede girar con demasiada rapidez y producir un daño severo. Nunca descargue por completo un motor serie ni conecte uno de ellos a una carga mediante una correa u otro mecanismo que pudiera romperse. Si ocurriera eso y el motor llegase a quedar sin carga mientras está girando, el resultado podría ser grave. La velocidad de los motores cd serie puede ser también insertando una resistencia en serie en el circuito del motor, pero esta técnica despilfarra potencia y sólo se utiliza en periodos intermedios durante el arranque de algunos motores. Hasta hace 30 años o más no había una forma conveniente de cambiar la ecuación 3-30 de modo que el único método de control de velocidad disponible fue la costosa resistencia en serie. Todo eso ha cambiado hoy en día debido a la introducción de los circuitos de control basados en el rectificador controlado por silicio (SCR).

3.8.2 Características experimentales del comportamiento del motor serie.

Para la conexión del motor en serie los parámetros obtenidos son: corriente de armadura (I_a) que es la misma que corriente de línea (I_L) ya que se encuentran conectados en serie ambos devanados, el par aplicado al eje del motor (τ_{carga}) y la velocidad de rotación (ω) en RPM del eje, manteniendo el voltaje en terminales del motor constante a 120 Volts. La tabla 3-7 muestra los resultados obtenidos en la conexión serie.

τ_{carga} (Lbf-in)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
0	1.14	2800	120
1	1.36	2725	120
2	1.57	2412	120
3	1.75	2180	120
4	1.89	2052	120
5	2.07	1910	120
6	2.23	1786	120
7	2.4	1712	120
8	2.56	1626	120
9	2.72	1560	120
9.6	2.82	1538	120
10	2.83	1514	120
11	3	1450	120
12	3.18	1400	120

13	3.26	1360	120
14	3.46	1320	120
15	3.74	1220	120
16	3.84	1191	120

Tabla 3-7 Resultados obtenidos en la conexión serie.

En la tabla 3-7 se aprecia que en condiciones de vacío se presenta una corriente de línea significativa, esto se debe a que el devanado serie tiene pocas vueltas de alambre grueso y por lo tanto presenta una baja resistencia lo cual da lugar a ésta corriente. Esta corriente de línea tiende a aumentar conforme aumenta la carga aplicada al eje del motor. También se puede observar que la velocidad tiende a disminuir conforme incrementa la carga. El comportamiento de la característica par-velocidad para la conexión serie de este motor se muestra en la figura 3-14, de acuerdo con los valores obtenidos en la prueba. Y como es de esperarse la velocidad disminuye conforme se le aplica carga mecánica al eje del motor.

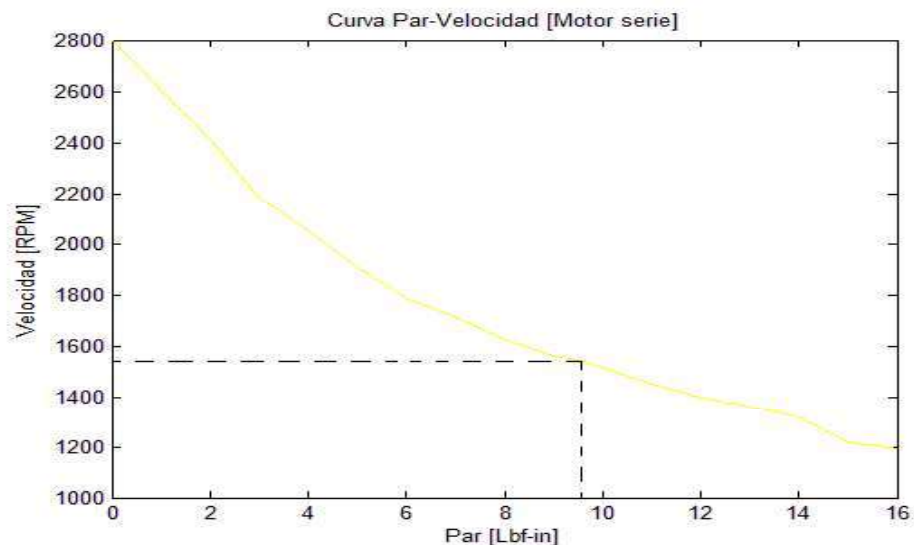


Fig. 3-14 Característica par-velocidad de la conexión serie.

De acuerdo con la tabla 3-7 y figura 3-14, se observa que se tienen condiciones nominales de corriente de línea en la máquina cuando se le aplica al eje del motor un par

igual a $9.6\text{ lbf} - \text{in}$, a su velocidad nominal de 1800 RPM. Ahora en estas condiciones nominales de la tabla 3-7, se calculará la regulación de velocidad, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina.

$$\text{Regulación de velocidad} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{2800 - 1538}{1538} = 82\%$$

Con una regulación de 82% se sabe que hay una gran disminución de velocidad del motor desde su condición de vacío hasta sus condiciones de plena carga, esto es debido a que la velocidad del motor es baja con cargas pesadas ya que una carga pesada demanda más corriente de armadura, lo cual provoca un aumento de flujo y una considerable disminución de velocidad en el motor.

La potencia de entrada y la potencia de salida:

$$P_{in} = I_L V_t = (2.82a)(120v) = 338.4 \text{ watts}.$$

$$P_{out} = \frac{(Par)(\text{velocidad})(1.59)}{100,000} = \frac{(9.6 \text{ lbf-in})(1538 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} (746) = 175.13 \text{ watts}.$$

Las pérdidas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 338.4\text{w} - 175.13\text{w} = 163.2 \text{ watts}.$$

Estas pérdidas obtenidas indican que mucha potencia de entrada se pierde en el interior de la máquina, ya que resultaron de 163.2 watts . Para conocer parte de las pérdidas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado serie y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 3-7 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado serie: } P_s = i_s^2 R_s = (2.82a)^2 (1.6\Omega) = 12 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (2.82a)^2 (14.9\Omega) = 118.4 \text{ watts}.$$

Las pérdidas en los conductores de cobre obtenidas son 130.4 watts grandes y por lo tanto se reflejarán en la eficiencia de la máquina en conexión serie.

Como último dato se conocerá la eficiencia de la máquina de cd en conexión serie.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{175.13 \text{ watts}}{338.4 \text{ watts}} = 51\%$$

También en esta conexión serie se presenta una baja eficiencia debido a las pérdidas de la máquina, esto da como resultado una eficiencia del 51%, lo cual muestra que no es una máquina muy eficiente.

Otro dato importante es la corriente de arranque del motor en condiciones de plena carga, esto es, se pondrá en marcha el motor con un par de carga de $9.6 \text{ lbf} - \text{in}$ el cual provoca que el motor se encuentre en sus condiciones nominales de operación de acuerdo con la Tabla 3-7.

$$i_{arranque} = 7.85A$$

Esta corriente de arranque es aproximadamente 3 veces mayor que la corriente a plena carga, y es menor a las corrientes de arranque para las conexiones shunt e independiente. Pero de igual manera es una corriente excesiva y puede provocar daños a la máquina. Mientras tanto el par de arranque es de:

$$\tau_{arranque} = 27 \text{ lbf} - \text{in}$$

Este es un par de arranque muy fuerte y es una característica correspondiente para el motor en conexión serie. Ya que el par de arranque será muy grande a corrientes de armadura intensas, tales como las que se presentan al arranque.

3.8.3 Motores en serie frente a los motores shunt (Derivación).

El motor en serie es usualmente utilizado en ferrocarriles, carros de transporte rápido o en los tipos tradicionales de carros como los montacargas. Un ferrocarril típico, o cualquiera de las otras aplicaciones mencionadas requieren un par muy grande para el arranque y la aceleración en los niveles bajos.

El problema de rebasar en autopistas, con su exigencia de grandes aceleraciones en el rango de velocidades de mediana magnitud, es totalmente ajeno a la práctica en

ferrocarriles. Otra consideración es que, en los comienzos de los motores de los trenes eléctricos y sus aplicaciones, no era posible utilizar cajas de cambios (transmisión) debido al estado de la tecnología en ese entonces. Aun cuando la mayoría de los expertos opina que el motor en serie es el ideal para el servicio en vehículos, eso no deja de ser sólo un punto de vista tradicional.

Un estudio en carretera del par de un vehículo contra sus requerimientos de velocidad muestra que la mayor parte de los automóviles con motor de gasolina cuyo desempeño se ha considerado satisfactorio en el rango de las velocidades de rebase alcanzan su par máximo en, o después de, las velocidades usuales en carretera.

La mayor parte de los automóviles eléctricos experimentales que se han construido hasta ahora en busca de vehículos poco contaminantes y con bajo consumo de energía han tenido un desempeño muy insatisfactorio en los rebases en carretera. El mismo vehículo puede tener una aceleración comparativamente buena debajo de las 30 mph (48.2 km/h) debido al gran par que puede ejercer su motor en serie a bajas velocidades.

El motor en derivación, o incluso el motor con excitación independiente si se usa con una transmisión manual normal o una transmisión automática con un sistema especial de válvulas, parece una combinación más satisfactoria. Este es otro ejemplo de que un conocimiento de las características de un dispositivo puede contribuir a cambiar ideas con un largo tiempo aceptadas. Aun así, los automóviles eléctricos más recientes usan motores de inducción de ca y controles muy elaborados.

3.9 Motor de cd en conexión compuesta.

Si un motor de cd tiene campos tanto en derivación como en serie, se le conoce como motor compuesto. Cuando se instala un campo combinado en serie y en derivación en los polos de la máquina de cd, el campo serie puede ser compuesto acumulado o compuesto diferencial. Sin embargo, independientemente de la composición, la corriente en el circuito de shunt y el flujo de campo Φ_f durante el arranque o el funcionamiento, es constante. Los puntos que aparecen en las dos bobinas de campo tienen el mismo significado que los

puntos en un transformador: la corriente que fluye hacia un punto produce una fuerza magnetomotriz positiva.

3.9.1 Motor en conexión compuesta acumulativa.

Cuando el motor se conecta de modo que el campo en serie apoye al campo en derivación, se le conoce como **motor compuesto acumulativo**. Esto sucede cuando la corriente fluye hacia los puntos en ambas bobinas de campo, y las fuerzas magnetomotrices resultantes se suman para producir una fuerza magnetomotriz total más grande. Aquí el flujo de campo en serie está en función de la corriente de armadura. Comenzando con un flujo igual al de campo en derivación sin carga y uno que aumente con la corriente de armadura. La figura 3-15 y la figura 3-16 nos muestra el circuito equivalente del motor compuesto acumulativo en conexión larga y corta respectivamente.

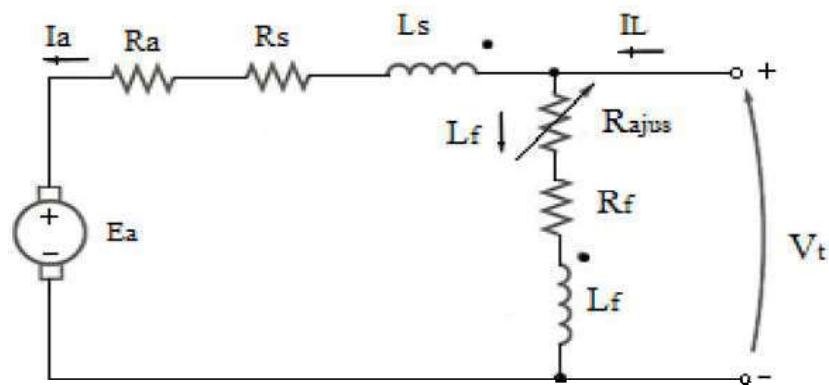


Fig. 3-15 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta acumulativa larga.

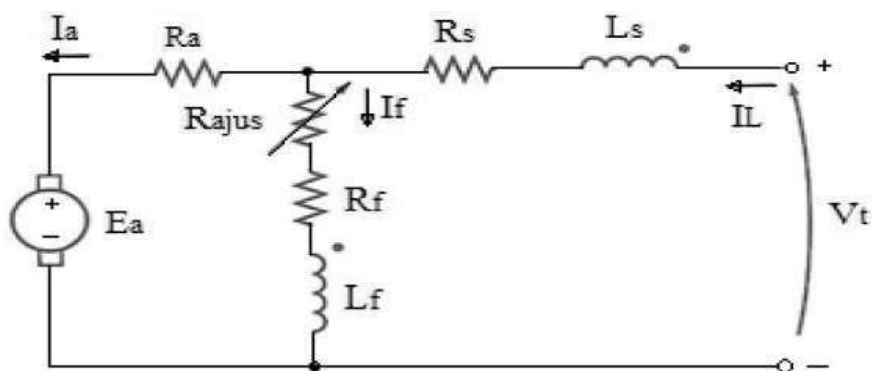


Fig. 3-16 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta acumulativa corta.

El motor compuesto acumulativo desarrolla un gran par para ajustarse a un incremento en el par de la carga, igual que un motor en serie. No obstante, el motor compuesto acumulativo tiene una velocidad en vacío definida y controlable, de manera que no existe el problema de desboque. Por ello, este tipo de motor es en particular adecuado en los usos que requieren aplicaciones bruscas de cargas grandes. Algunos de esos usos son las máquinas laminadoras o las grandes troqueladoras o cortadoras.

Una ventaja en particular en la aplicación súbita de cargas grandes pero de corta duración consiste en que cuando el motor disminuye su velocidad de rotación al recibir la carga, entrega parte de su energía cinética almacenada para mover la carga. Si la velocidad se mantuviese más constante, tendrían que demandarse grandes corrientes pico de la línea de alimentación debido al transitorio resultante. Las grúas, los malacates y los elevadores utilizan motores compuestos acumulativos, ya que de esa manera pueden poner en marcha con suavidad una carga pesada sin tener un aumento excesivo de su velocidad al operar en vacío. A menudo el campo en serie se desconecta en forma automática del circuito, cuando el malacate está en su velocidad de operación. En estado estable opera sólo el campo en derivación. La ley de voltaje de Kirchhoff para un motor compuesto acumulativo es:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_s) \quad 3-31$$

Las corrientes en el motor compuesto están relacionadas por:

$$I_a = I_{linea} - I_f \quad 3-32$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad 3-33$$

La fuerza magnetomotriz neta y la corriente de campo en derivación efectiva en el motor compuesto están dadas por:

$$\mathcal{F}_{net} = N_f \mathcal{F}_F + N_s I_a - \mathcal{F}_{AR} \quad 3-34$$

Donde:

$N_f \mathcal{F}_F$ Fuerza magnetomotriz del devanado shunt.

N_s Número de vueltas en el devanado serie.

I_a Corriente de armadura.

$\mathcal{F}_{AR}$ Fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura.

$$I_F^* = I_F + \frac{N_S}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F} \quad 3-35$$

Donde:

I_F Corriente de campo.

N_S Número de espiras en el devanado serie.

N_F Número de espiras en el devanado shunt.

$\mathcal{F}_{AR}$ Fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura.

I_A Corriente de armadura.

3.9.2 Comportamiento par-velocidad del motor compuesto acumulativo.

En el motor de cd compuesto acumulativo hay un flujo que es constante y otro que es proporcional a la corriente de la armadura (por lo tanto a su carga). Esto significa que el motor compuesto acumulativo tiene un par de arranque más alto que un motor en derivación (cuyo flujo es constante) pero un par de arranque menor al de un motor en serie (cuyo flujo total es proporcional a la corriente de armadura)

En cierto sentido, el motor de cd compuesto acumulativo combina las mejores características tanto del motor en derivación como del motor en serie. Al igual que un motor en serie, tiene un par extra para el arranque; al igual que un motor en derivación, no se desboca en vacío. Con cargas ligeras, el campo en serie tiene un efecto muy pequeño, por lo que el motor se comporta casi como un motor de cd en derivación. Conforme aumenta la carga, el flujo en serie es muy importante y la curva par-velocidad se comienza a parecer a la característica de un motor serie.

La figura 3-17 nos da una clara idea del comportamiento de éste motor.

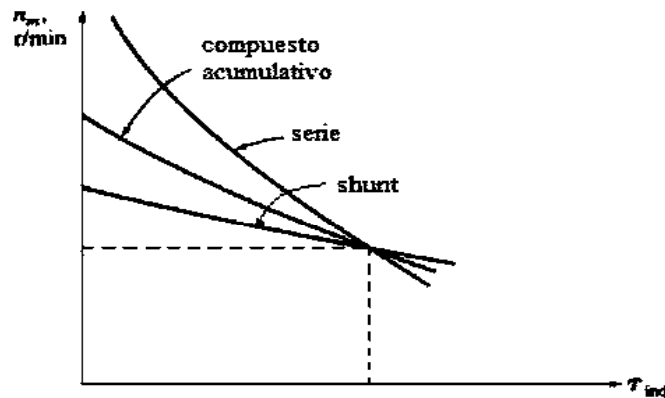


Fig. 3-17 Característica par-velocidad del motor cd compuesto acumulativo en comparación con los motores serie y shunt.

3.9.3 Control de velocidad del motor compuesto acumulativo.

Las técnicas disponibles para el control de velocidad en un motor de cd compuesto acumulativo son las mismas disponibles para un motor shunt:

1. Cambio en la resistencia de campo R_f .
2. Cambio en el voltaje de armadura V_a .
3. Cambio en la resistencia de armadura R_a .

Los argumentos que describen los efectos de cambiar R_f y V_a son muy parecidos a los argumentos para el control de velocidad del motor shunt. En teoría, se puede controlar al motor de cd compuesto diferencial de una forma silmilar.

3.9.4 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto acumulativa larga.

Para la conexión compuesta acumulativa larga operando como motor, los parámetros obtenidos siguen siendo los mismos que en la conexión shunt: corriente de

armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de línea (I_L), el par aplicado al eje del motor (τ_{carga}) y la velocidad de rotación (ω) en RPM del eje, también manteniendo el voltaje en terminales del motor constante a 120 Volts. La tabla 3-8 presenta los resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa larga.

τ_{carga} (Lbf-in)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
0	0.78	0.17	0.94	1888	120
1	0.94	0.17	1.10	1763	120
2	1.11	0.17	1.26	1665	120
3	1.24	0.17	1.40	1594	120
4	1.37	0.17	1.53	1540	120
5	1.53	0.17	1.69	1482	120
6	1.67	0.17	1.82	1433	120
7	1.8	0.17	1.96	1387	120
8	1.93	0.17	2.09	1353	120
9	2.05	0.17	2.21	1304	120
10	2.22	0.17	2.37	1260	120
11	2.37	0.17	2.53	1229	120
12	2.46	0.17	2.62	1209	120
13.5	2.64	0.17	2.81	1155	120

14	2.77	0.17	2.94	1133	120
15	2.92	0.17	3.08	1098	120
16	3.03	0.17	3.19	1070	120
17	3.19	0.17	3.35	1042	120
18	3.28	0.17	3.43	1015	120
19	3.49	0.17	3.66	977	120

Tabla 3-8 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa larga.

Observando la tabla 3-8 se aprecia que en condiciones de vacío, se presenta una corriente muy pequeña de línea debido a que el motor se comporta como un motor shunt, y al momento de ir aplicando carga al motor, se empieza a incrementar la corriente de línea. También podemos ver que la velocidad tiende a disminuir conforme incrementa la carga, pero no cae tan drásticamente porque al incrementar la carga, el motor se empieza a comportar como un motor shunt y esto hace que la velocidad no caiga tan rápido. El comportamiento de la característica par-velocidad para la conexión compuesta acumulativa larga se muestra en la figura 3-18, de acuerdo con los valores obtenidos en la prueba.

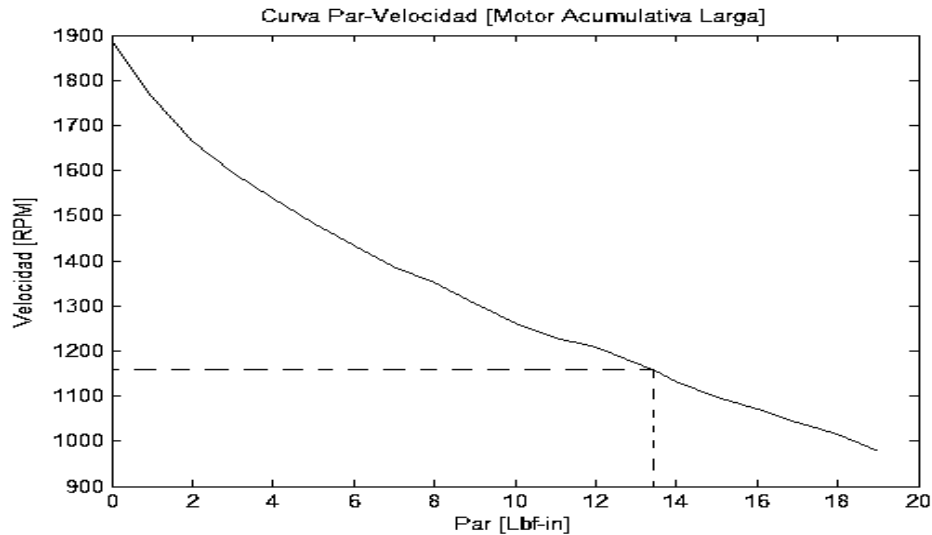


Fig. 3-18 Característica par-velocidad, acumulativa larga.

De acuerdo con la tabla 3-8 y figura 3-18, se observa que se tiene condición nominal de corriente de línea en la máquina cuando se le aplica al eje del motor un par igual a $13.5 \text{ lbf} - \text{in}$. Ahora en esta condición nominal, se puede conocer de la tabla 3-8, la regulación de velocidad, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina.

$$\text{Regulación de velocidad} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{1888 - 1155}{1155} = 63\%$$

Una regulación de 63% indica que en la conexión compuesta diferencial larga existe una mayor caída de velocidad del motor al pasar de su condición de vacío a su condición de plena carga. Ahora se calculará la potencia de entrada y la potencia de salida del motor respectivamente.

$$P_{in} = I_L V_t = (2.81a)(120v) = 337.2 \text{ watts}.$$

$$P_{out} = \frac{(\text{Par})(\text{velocidad})(1.59)}{100,000} = \frac{(13.5)(1555)(1.59)}{100,000} (746) = 184 \text{ watts}.$$

Con estas potencias se pueden conocer las pérdidas generadas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 337.2w - 184w = 153.2 \text{ watts}$$

Estas pérdidas son grandes y gran potencia de entrada se pierde en el interior de la máquina. Para conocer parte de las pérdidas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado serie, shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 3-8 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado serie: } P_s = i_s^2 R_s = (2.81a)^2 (1.6\Omega) = 12.6 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (2.64a)^2 (14.9\Omega) = 103 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado shunt: } P_f = i_f^2 R_f = (0.17a)^2 (278\Omega) = 8 \text{ watts}.$$

Las pérdidas en los conductores de cobre obtenidas son de 123.6 watts , y por lo tanto se reflejarán en la eficiencia de la máquina. Como último dato se conocerá la eficiencia de la máquina de cd en conexión compuesta acumulativa larga.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{184 \text{ watts}}{337.2 \text{ watts}} = 54\%$$

La eficiencia de esta máquina en conexión compuesta acumulativa larga es baja, esto es porque existen grandes pérdidas internas en la máquina, por lo que tenemos una eficiencia del 54%, esta eficiencia obtenida es mayor que en la conexión independiente, shunt y serie.

Otro dato importante es la corriente de arranque del motor en condiciones de plena carga, esto es, se pondrá en marcha el motor con un par de carga de $13.5 \text{ lbf} - \text{in}$ el cual provoca que el motor se encuentre en sus condiciones nominales de operación de acuerdo con la Tabla 3-8.

$$i_{arranque} = 7.17a$$

Esta corriente de arranque es aproximadamente 3 veces mayor que la corriente a plena carga y también puede llegar a causarle daños a los devanados de la máquina. Por otro lado el par de arranque es de:

$$\tau_{arranque} = 27 \text{ lbf} - \text{in}$$

Este par de arranque también es muy fuerte y es una característica correspondiente para el motor en conexión compuesto acumulativa larga, ya que cuanta con el devanado serie.

3.9.5 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto acumulativa corta.

Al igual que en la conexión compuesta acumulativa larga, ahora en la conexión compuesta acumulativa corta obtendremos los mismos parámetros antes obtenidos: corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de línea (I_L), el par aplicado al eje del motor (τ_{carga}) y la velocidad de rotación en RPM del eje, también manteniendo el voltaje en terminales del motor constante a 120 Volts. La tabla 3-9 presenta los resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa corta.

τ_{carga} (Lbf-in)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
0	0.78	0.16	0.94	1811	120
1	0.96	0.16	1.11	1700	120
2	1.10	0.16	1.25	1630	120
3	1.26	0.16	1.41	1559	120
4	1.40	0.16	1.55	1504	120
5	1.54	0.16	1.70	1444	120
6	1.66	0.16	1.82	1414	120
7	1.8	0.16	1.96	1361	120
8	1.95	0.16	2.10	1325	120
9	2.07	0.16	2.22	1315	120
10	2.25	0.16	2.39	1253	120
11	2.38	0.16	2.53	1249	120
12	2.50	0.16	2.64	1195	120
13	2.65	0.16	2.8	1166	120
14	2.78	0.16	2.92	1138	120
15	2.92	0.16	3.07	1097	120
16	3.02	0.16	3.27	1075	120
17	3.23	0.16	3.38	1031	120

18	3.35	0.16	3.50	992	120
19	3.50	0.16	3.66	971	120
20	3.65	0.16	3.81	929	120
21	3.80	0.16	3.95	920	120

Tabla 3-9 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa corta.

En la tabla 3-9 también se aprecia lo mismo en condiciones de vacío como en la conexión compuesta acumulativa larga, se presenta la misma corriente pequeña de línea debido a que el motor se comporta sin carga como un motor shunt, y al momento de ir aplicando carga al motor, se empieza a incrementar la corriente de línea lo cual hace que se refuerce el campo serie. También podemos ver que la velocidad tiende a disminuir conforme incrementa la carga, pero no cae tan drásticamente porque al incrementar la carga el motor se empieza a comportar como un motor shunt y esto hace que la velocidad no caiga tan rápido. El comportamiento de la característica par-velocidad para la conexión compuesta acumulativa corta se muestra en la figura 3-19, de acuerdo con los valores obtenidos en la prueba.

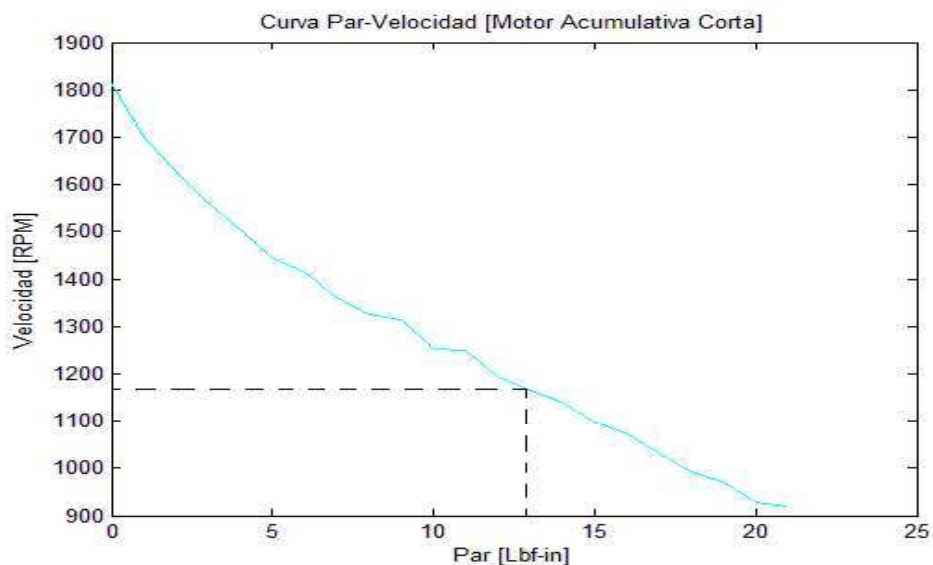


Fig. 3-19 Característica par-velocidad, acumulativa corta.

De acuerdo con la tabla 3-9 y figura 3-19, se observa que se tiene condición nominal de corriente de línea en la máquina cuando se le aplica al eje del motor un par igual a $13 \text{ lbf} - \text{in}$. Ahora en esta condición nominal, se puede calcular de la tabla 3-9, la regulación de velocidad, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina.

$$\text{Regulación de velocidad} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{1811 - 1166}{1166} = 55\%$$

Esta regulación de 55% en comparación con la conexión acumulativa larga, son prácticamente similares ya que tienen el mismo comportamiento dichas conexiones. Ahora se calcula la potencia de entrada y la potencia de salida.

$$P_{in} = I_L V_t = (2.8a)(120v) = 336 \text{ watts}.$$

$$P_{out} = \frac{(Par)(\text{velocidad})(1.59)}{100,000} = \frac{(13 \text{ lbf-in})(1166 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} (746) = 179.7 \text{ watts}.$$

Con estas potencias podemos conocer las pérdidas generadas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 336w - 179.7w = 156.3$$

Estas pérdidas son grandes y gran potencia de entrada se pierde en el interior de la máquina. Para conocer parte de las pérdidas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado serie, shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 3-9 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado serie: } P_s = i_s^2 R_s = (2.8a)^2 (1.6\Omega) = 12.5 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (2.65a)^2 (14.9\Omega) = 104.6 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado shunt: } P_f = i_f^2 R_f = (0.16a)^2 (278\Omega) = 7.1 \text{ watts}.$$

Estas pérdidas obtenidas en los conductores son de 124.2 watts, estas pérdidas provocarán una menor eficiencia. Como último dato conoceremos la eficiencia de la máquina de cd en conexión compuesta acumulativa corta.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{179.7}{336} = 53\%$$

La eficiencia de esta máquina en conexión compuesta acumulativa corta es baja, debido a las grandes pérdidas internas en la máquina, por lo que tenemos una eficiencia del 53%, esta eficiencia obtenida es mayor que en la conexión independiente, shunt y serie.

Otro dato importante es la corriente de arranque del motor en condiciones de plena carga, esto es, se pondrá en marcha el motor con un par de carga de 13 *lbf – in* el cual provoca que el motor se encuentre en sus condiciones nominales de operación de acuerdo con la Tabla 3-9.

$$i_{arranque} = 7.27a$$

Esta corriente de arranque es aproximadamente también 3 veces mayor que la corriente a plena carga y puede causar daños en los devanados y aislamientos de la máquina. Por otro lado el par de arranque es de:

$$\tau_{arranque} = 27 \text{ lbf} - \text{in}$$

Este par de arranque también es muy fuerte y es una característica correspondiente para el motor en conexión compuesto acumulativa corta, ya que cuanta con el devanado serie.

3.9.6 Motor en conexión compuesta diferencial.

Si el campo en serie se conecta para oponerse al campo en derivación, entonces es un **motor compuesto diferencial**. Y éste se logra si la corriente fluye hacia el punto en una bobina de campo y hacia afuera del punto en la otra bobina de campo y por lo tanto la fuerza magnetomotriz resultante se resta. Aquí el flujo en serie está en función de la corriente de armadura y el flujo de campo es probablemente constante.

Comenzando con un flujo igual al del campo en derivación sin carga, cualquier valor de la corriente de armadura producirá una fuerza magnetomotriz en el campo en serie que reduce el flujo total en el entrehierro y por lo tanto el par. Así, el motor compuesto diferencial produce una curva de par que siempre es menor que la del motor shunt. La

figura 3-20 nos muestra el circuito equivalente del motor compuesto diferencial en conexión larga, y la figura 3-21 nos muestra la conexión del motor diferencial corta.

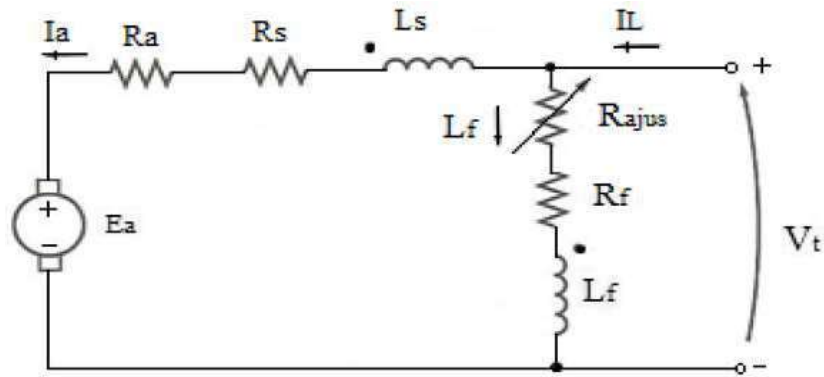


Fig. 3-20 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta diferencial larga.

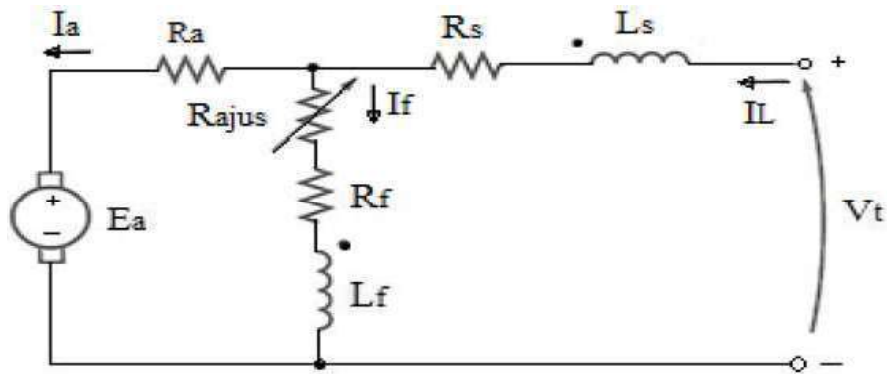


Fig. 3-21 Circuito equivalente de un motor en conexión compuesta diferencial corta.

El motor compuesto diferencial no se utiliza tan ampliamente, pero tiene algunas características especiales que lo hacen útil para algunas aplicaciones especiales. Cuando el efecto de oposición del campo en serie se ajusta de modo que el efecto de pérdida de flujo cancele exactamente la pérdida de velocidad de un motor en derivación con carga, lo que se obtiene es una velocidad muy constante.

Sin embargo, el motor diferencial presenta dos problemas principales de operación que limitan su uso:

1. Cuando se usan para una velocidad constante o incluso creciente con características de carga, el motor tendera a "huir", es decir, a aumentar en forma drástica su

velocidad con una carga elevada.

2. Este mismo efecto del campo en serie tendiente al "apoderamiento" hará que un motor compuesto diferencial arranque en la dirección opuesta a la deseada, a menos que la corriente de arranque con cuidado se mantenga pequeña.

Por lo general, el campo en serie se desconecta mediante una conmutación especial durante el arranque. Así como el generador compuesto diferencial es una máquina para aplicaciones muy específicas, el motor compuesto diferencial también lo es, y aun más.

La ley de voltaje de Kirchhoff para un motor compuesto acumulativo es:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_s) \quad 3-36$$

Las corrientes en el motor compuesto están relacionadas por:

$$I_a = I_{linea} - I_f \quad 3-37$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad 3-38$$

La fuerza magnetomotriz neta y la corriente de campo en derivación efectiva en el motor compuesto están dadas por:

$$\mathcal{F}_{net} = N_f \mathcal{F}_f - N_s I_a - \mathcal{F}_{AR} \quad 3-39$$

y

$$I_F^* = I_F - \frac{N_s}{N_f} I_a - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_f} \quad 3-40$$

3.9.7 Comportamiento par-velocidad de un motor compuesto diferencial.

En un motor cd compuesto diferencial la fuerza magnetomotriz en derivación y la fuerza magnetomotriz en serie se restan una de la otra. Esto significa que cuando la carga aumenta en el motor, la corriente de armadura se incrementa y el flujo en el motor disminuye.

Como el flujo disminuye, la velocidad del motor aumenta. Este aumento de velocidad provoca otro incremento en la carga el cual eleva más la corriente de armadura, disminuye más el flujo e incrementa de nuevo la velocidad. El resultado es que un motor compuesto diferencial no es estable y tiende a desbocarse. Esta inestabilidad es mucho peor que la de un motor en derivación con reacción de armadura. Es tan fuerte, que un motor compuesto diferencial es inadecuado para cualquier tipo de aplicación.

Para empeorar la situación, es imposible arrancar un motor de este tipo. En condiciones de arranque las corrientes de armadura y de campo en serie son muy altas. Puesto que el flujo en serie se resta del flujo en derivación, el campo en serie puede invertir la polaridad magnética de los polos de la máquina. Por lo regular, el motor permanece inmóvil o gira lentamente en la dirección contraria mientras se quema por la excesiva corriente de inducido. Para arrancar este tipo de motores el campo en serie debe estar en cortocircuito para que se comporte como un motor en derivación ordinario durante el periodo de arranque. En la figura 3-22 se muestra una típica característica en las terminales de un motor cd compuesto diferencial.

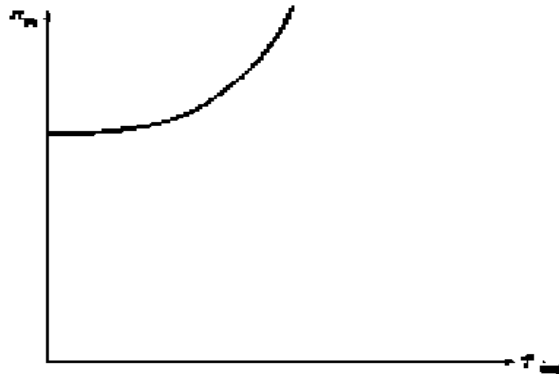


Fig. 3-22 Característica par-velocidad de un motor de cd, compuesto diferencial.

3.9.8 Control de velocidad en motores compuesto diferencial.

Las técnicas disponibles para el control de velocidad en un motor de cd compuesto diferencial son las mismas disponibles para un motor shunt:

1. Cambio en la resistencia de campo R_f .
2. Cambio en el voltaje de armadura V_a .

3. Cambio en la resistencia de armadura R_a .

El motor compuesto diferencial podría ser controlado variando cualquiera de las tres características anteriores, pero esto poco importa, puesto que el motor compuesto diferencial casi nunca se utiliza.

3.9.9 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto diferencial larga.

Al igual que en la conexión compuesta acumulativa larga, ahora en la conexión compuesta diferencial larga obtendremos los mismos parámetros antes obtenidos: corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de línea (I_L), el par aplicado al eje del motor (τ_{carga}) y la velocidad de rotación en RPM del eje, también manteniendo el voltaje en terminales del motor constante a 120 Volts. La tabla 3-10 muestra los resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa corta.

τ_{carga} (Lbf-in)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
0	3.56	0.26	3.83	3027	120
1	3.9	0.26	4.27	2734	120
2	4.66	0.25	4.29	2451	120
3	4.95	0.24	5.21	2274	120
4	5.14	0.24	5.42	2088	120
5	5.43	0.24	5.7	1909	120

Tabla 3-10 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial larga.

En la tabla 3-10 se observa que hay mucha corriente de línea en condiciones de vacío, esto es debido a que los flujos del devanado serie y shut se están restando lo cual provoca un incremento en la corriente. También podemos ver que la velocidad tiende a disminuir conforme incrementa la carga, cae drásticamente porque al incrementar la carga el motor se vuelve más inestable ya que se restan los flujos y la velocidad se incrementa demasiado. El comportamiento de la característica par-velocidad para la conexión compuesta acumulativa corta se muestra en la figura 3-23, de acuerdo con los valores obtenidos en la prueba.

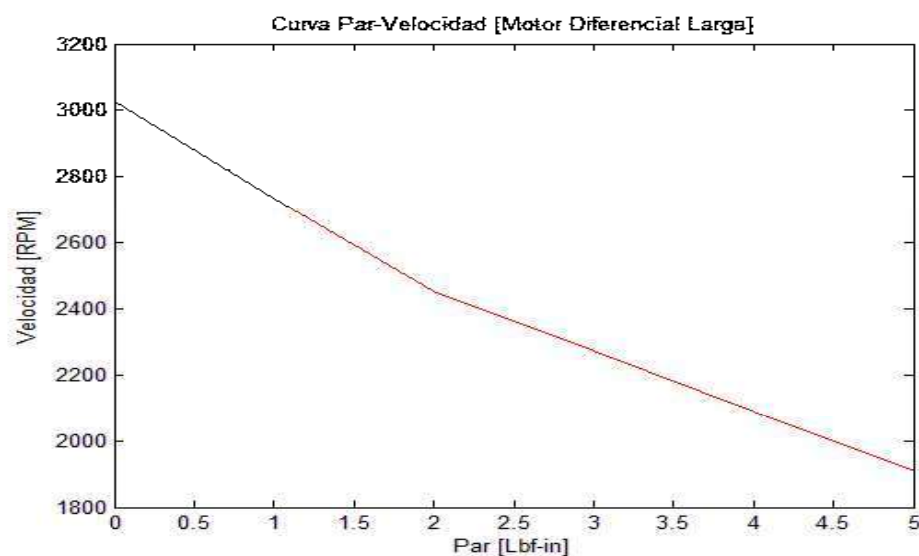


Fig. 3-23 Característica par-velocidad, diferencial larga.

Debido a que el motor en conexión compuesta diferencial es muy inestable, no se logran las condiciones nominales de la máquina de cd. Como se puede ver en la tabla 3-10 la corriente que aparece en vacío es mucho mayor a la corriente a plena carga, por lo tanto no se pudo operar el motor en sus condiciones nominales de carga. En consecuencia no se pueden realizar los cálculos relacionados con la regulación de velocidad, potencia de entrada y salida, pérdidas y eficiencia de la máquina. Solamente se logra conocer el par de arranque y corriente de arranque respectivamente.

$$i_{\text{arranque}} = 9.38 \text{ a} \qquad \tau_{\text{arranque}} = 27 \text{ lbf} - \text{in}$$

Como se puede ver la conexión compuesta diferencial larga tiene una corriente de arranque 3 veces mayor que su corriente nominal y presenta un alto par de arranque.

3.9.10 Características experimentales del comportamiento del motor compuesto diferencial corta.

Al igual que en la conexión compuesta diferencial larga, ahora en la conexión compuesta diferencial corta obtendremos los mismos parámetros antes obtenidos: corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de línea (I_L), el par aplicado al eje del motor (τ_{carga}) y la velocidad de rotación en RPM del eje, también manteniendo el voltaje en terminales del motor constante a 120 Volts. La tabla 3-11 muestra los resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa corta.

τ_{carga} (Lbf-in)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
0	3.5	0.24	3.77	3390	120
1	3.88	0.23	4.12	2906	120
2	4.10	0.23	4.32	2654	120
3	4.39	0.22	4.61	2436	120
4	5.62	0.22	4.85	2264	120
5	5.85	0.22	5.06	2108	120

Tabla 3-11 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial corta.

En la tabla 3-11 se ve que también hay mucha corriente de línea en condiciones de vacío, esto es debido a que los flujos del devanado serie y shut se están restando y por lo tanto provoca un incremento en la corriente. También podemos ver que la velocidad tiende a disminuir conforme incrementa la carga, cae drásticamente porque al elevar la carga

aplicada al eje del motor, causa que la corriente de línea se eleve y por lo tanto se produce más flujo el cual se estará restando y el motor se vuelve más inestable. El comportamiento de la característica par-velocidad para la conexión compuesta acumulativa corta se muestra en la figura 3-24, de acuerdo con los valores obtenidos en la prueba.

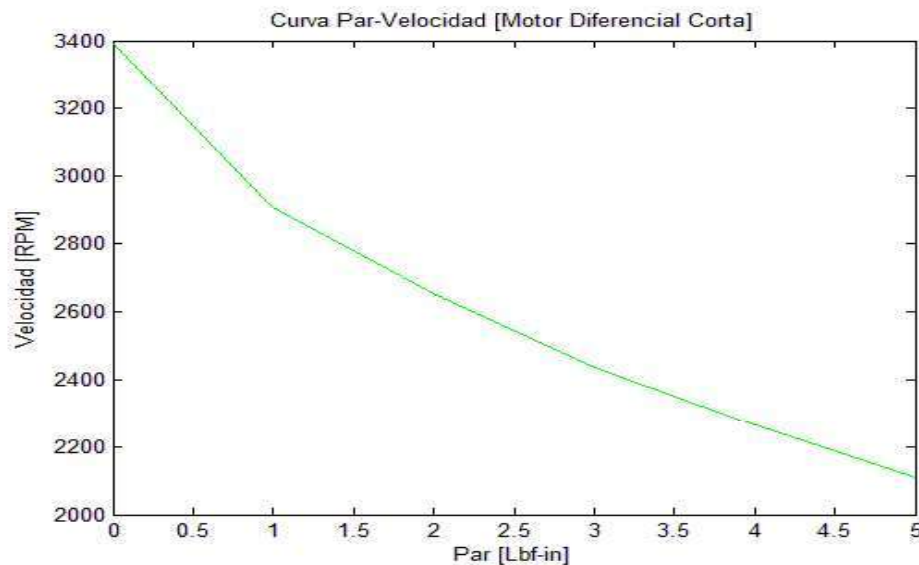


Fig. 3-24 Característica par-velocidad, diferencial corta.

Sucede lo mismo que en la conexión diferencial larga, el motor en conexión compuesta diferencial corta es muy inestable, no se alcanzan las condiciones nominales de la máquina de cd. Como se observa en la tabla 3-11 la corriente que aparece en vacío también excede a la corriente a plena carga, por lo tanto no se puede operar el motor en sus condiciones nominales de carga. En consecuencia no se pueden realizar los cálculos relacionados con la regulación de velocidad, potencia de entrada y salida, pérdidas y eficiencia de la máquina. Solamente se logra conocer el par de arranque y corriente de arranque respectivamente.

$$i_{\text{arranque}} = 9.60 \text{ a} \quad \tau_{\text{arranque}} = 27 \text{ lbf} - \text{in}$$

Como se puede ver la conexión compuesta diferencial corta, también tiene una corriente de arranque 3 veces mayor que su corriente nominal y presenta un alto par de arranque.

3.9.11 Resumen sobre las diferentes conexiones del motor cd.

En la figura 3-25 se muestran todas las curvas características de par-velocidad de la máquina de cd operando como motor, para cada una de las diferentes conexiones: independiente, shunt, serie, compuesta acumulativa larga y corta, compuesta diferencial larga y corta. Como podemos observar en la gráfica, en la curva para la conexión shunt la velocidad en vacío es de 2266 RPM, no es una velocidad muy elevada y empieza a disminuir conforme va aumentando la carga hasta sus condiciones nominales, ésta disminución de velocidad no es muy significativa por lo tanto se dice que el motor shunt es en esencia un motor de velocidad constante. Esta misma característica de par-velocidad se presenta en la conexión excitación independiente y por lo tanto su curva es muy parecida a la del comportamiento en conexión shunt.

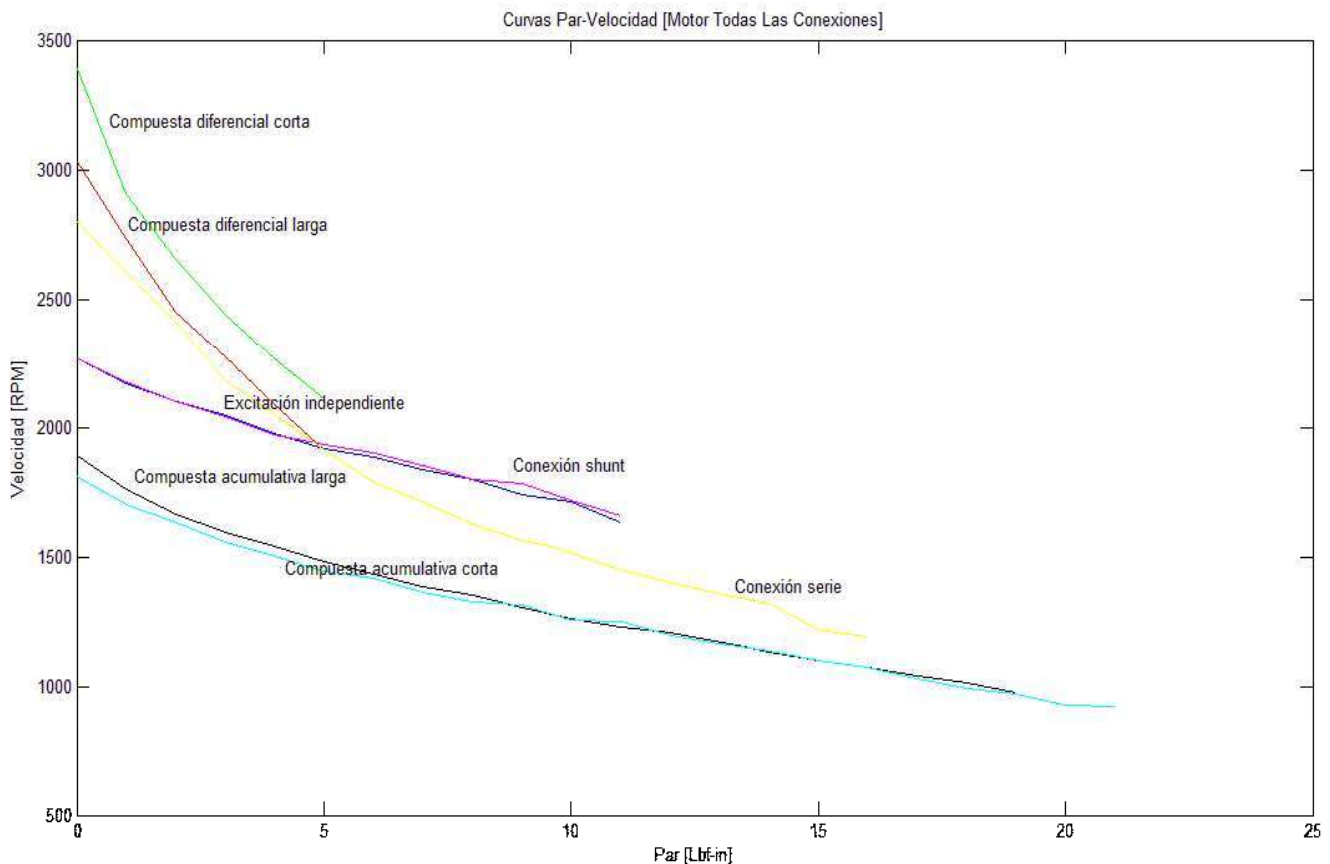


Fig. 3-25 Características par-velocidad para las conexiones del motor cd.

Ahora en la curva para la conexión serie, se presenta en vacío una velocidad de 2800 RPM, esta velocidad es mayor que en la conexión independiente y shunt. Se observa que existe una caída más drástica de velocidad conforme aumenta la carga aplicada, esto nos indica que tiene un amplio rango para variar su velocidad, por lo tanto es un motor de velocidad variable y se puede decir que en verdad tiene velocidades pequeñas para cargas muy grandes, lo cual es una característica importante del motor serie.

Para la conexión compuesta acumulativa, observamos que tanto la conexión larga y corta son muy parecidas, en condiciones de vacío la conexión compuesta acumulativa larga tiene una velocidad de 1888 RPM, en tanto que la velocidad en la conexión compuesta acumulativa corta es de 1811 RPM. Estas dos conexiones se comportan de manera similar, no presentan grandes diferencias una de la otra bajo condiciones en vacío hasta las condiciones nominales de operación de la máquina. En condiciones de vacío se presenta baja velocidad debido a que el motor se comporta como un motor shunt, pero a medida que va aumentando la carga aplicada al motor, se va incrementando la corriente de línea, lo cual provoca que el flujo también aumente y este aumento de flujo provoca que la velocidad empiece a disminuir. Conforme aumenta la carga aplicada, el motor empieza a comportarse como un motor serie, adquiriendo su alto valor de par.

En la conexión compuesta diferencial se aprecia que en condiciones de vacío, la conexión compuesta larga tiene una velocidad 3027 RPM en cambio la conexión compuesta diferencial corta tiene una velocidad mayor, de 3390 RPM. Estas dos conexiones son muy inestables ya que con un valor muy pequeño de carga aplicada al eje del motor, se tiene una rápida disminución en la velocidad del motor. En consecuencia con valores muy pequeños de carga, se sobrepasan las condiciones nominales de operación de esta máquina. Este tipo de motores es muy inestable y tiene pocas aplicaciones.

CAPÍTULO 4

Operación de la Máquina de Corriente Directa como generador.

4.1 Introducción a los generadores de cd.

Los generadores de cd son máquinas de corriente directa (cd). No hay diferencia real entre un generador y un motor excepto por la dirección del flujo de potencia. La máquina de corriente directa es un caso particular de las máquinas que utilizan conmutador. Las máquinas de corriente directa son ampliamente utilizadas para el control de par y velocidad en los procesos industriales porque tienen una alta velocidad de respuesta. Una máquina de conmutador está constituida básicamente por un estator, un rotor y un conmutador acoplado sólidamente al rotor. El conmutador permite conectar los conductores del circuito de la armadura a la fuente de tensión continua mediante un juego de carbones o escobillas.

Existen 5 tipos principales de generadores de cd, clasificados de acuerdo con la manera de producir su flujo de campo.

- Generador de excitación separada.

En un generador de excitación separada, el flujo de campo se obtiene de una fuente de potencia separada del generador en sí mismo.

- Generador en derivación (shunt).

El flujo de campo se obtiene conectando el circuito de campo directamente a través de las terminales del generador.

- Generador en serie.

El flujo de campo se produce conectando el circuito de campo en serie con el inducido del generador.

- Generador compuesto acumulativo.

En un generador compuesto acumulativo están presentes tanto un campo en derivación como un campo serie y sus efectos son aditivos.

- Generador compuesto diferencial.

En un generador compuesto diferencial están presentes tanto un campo en derivación como un campo serie, pero sus efectos se restan.

Estos tipos de generadores de cd difieren en sus características en terminales (voltaje-corriente) y, por tanto, en las aplicaciones para las cuales son adecuados. Los generadores de cd son comparados por sus voltajes, potencias nominales, eficiencias y regulación de voltaje.

4.2 Regulación de voltaje en los generadores de cd.

La regulación de voltaje (VR) es un parámetro muy importante para todas las clases de generadores ya que es la razón de la diferencia entre el voltaje sin carga y aquella a plena carga al voltaje a carga nominal. La característica es normalmente una reducción a medida que la carga aumenta. La regulación de voltaje está definida por la ecuación 4-1

$$VR\% = \frac{V_{vacío} - V_{plena\ carga}}{V_{plena\ carga}} * 100 \quad 4-1$$

Todos los generadores están accionados por una fuente de potencia mecánica denominada motor primario del generador. Un motor primario para un generador puede ser una turbina de vapor, un motor diesel o también un motor eléctrico.

Los circuitos equivalentes de un generador de cd son similares a los circuitos equivalentes de los motores de cd, excepto que la dirección del flujo de corriente y las pérdidas de las escobillas se invierten.

4.3 Ecuación de voltaje generado (fem).

El voltaje inducido en cualquier generador de CD depende de tres factores:

$$E_a = K\phi n \quad 4-2$$

Donde:

E_a Es el voltaje interno generado expresado en volts.

ϕ Es el flujo de campo magnético en líneas por pulgada cuadrada, o en webers por metro cuadrado

n La velocidad en RPM del rotor de la máquina.

K Constante que depende de la construcción de la máquina, $K = \frac{ZP}{60a}$ y está determinada por muchos factores como los números de conductores (Z), polos de campo (P) y de trayectorias de corriente en el devanado de armadura (a) y por tanto son parámetros de diseño y en consecuencia son cantidades fijas.

4.4 Pérdidas y eficiencia del generador de cd.

Los generadores de cd toman potencia mecánica y producen potencia eléctrica, mientras que los motores de cd toman potencia eléctrica y producen potencia mecánica. En cualquier caso, no toda la potencia de entrada a la máquina es útil en el otro lado pues siempre hay alguna pérdida asociada al proceso.

Las pérdidas que ocurren en las máquinas de cd se pueden dividir en cinco categorías y la técnica para explicar las pérdidas de potencia en un generador de cd es el diagrama de flujos de potencia. La figura 4-1 nos muestra éste tipo de diagrama.

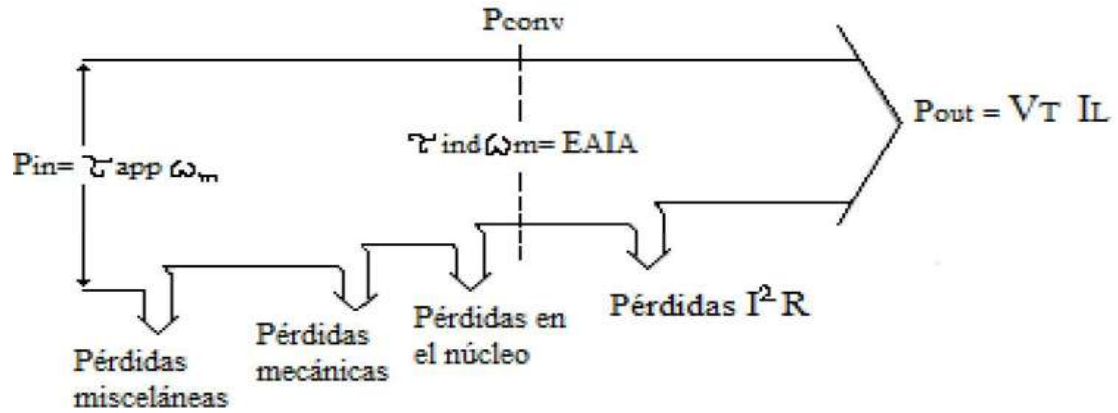


Fig 4-1 Diagrama de flujo de potencia para un generador de CD.

En la figura 4-1 muestra el diagrama de flujo de potencia para un generador cd, se puede observar que se suministra potencia mecánica a la máquina y luego se restan las pérdidas misceláneas, las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el núcleo. Después de restadas esas pérdidas, se convierte la potencia mecánica restante en potencia eléctrica en el punto indicado P_{conv} . La potencia mecánica convertida está dada por:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad 4-3$$

Y la potencia eléctrica resultante está dada por:

$$P_{conv} = E_A I_A \quad 4-4$$

Sin embargo ésta no es la potencia eléctrica que aparece en las terminales de la máquina. Antes de alcanzar las terminales, deben restarse las perdidas eléctricas $I^2 R$ y las pérdidas en las escobillas.

4.4.1 Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre.

Las pérdidas en el cobre ocurren en los devanados de la armadura y del campo de la máquina. Para los devanados de armadura y del campo, las pérdidas en el cobre están dadas por:

$$\text{Pérdidas en la armadura: } P_a = I_a^2 R_a \quad 4-5$$

$$\text{Pérdidas en el campo: } P_f = I_f^2 R_f \quad 4-6$$

Dónde:

P_a Pérdidas en la armadura en watts.

P_f Pérdidas en el circuito del campo en watts.

I_a Corriente de armadura en amperes.

I_f Corriente de campo en amperes.

R_a Resistencia de la armadura en ohms.

R_f Resistencia de campo en ohms.

4.4.2 Perdidas en las escobillas.

Las pérdidas en las escobillas corresponden a la potencia perdida a través del contacto potencial en las escobillas de la máquina. Están dadas por la ecuación siguiente.

$$P_{esc} = V_{BD} I_a \quad 4-7$$

Donde:

P_{esc} Pérdidas por caída en las escobillas en watts.

V_{BD} Caída de voltaje en las escobillas en volts.

I_a Corriente de armadura en amperes.

Las pérdidas en las escobillas se calculan de éste modo porque la caída de voltaje a través de un conjunto de escobillas es aproximadamente constante en un amplio rango de corrientes del inducido. A menos que se especifique lo contrario, se supone que es normal la caída de voltaje en las escobillas: alrededor de 2 volts.

4.4.3 Pérdidas en el núcleo.

Las pérdidas en el núcleo son las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que ocurren en el metal del motor. Estas pérdidas varían con el cuadrado de la densidad de flujo (B^2) y en el rotor con la 1.5ésima potencia de la velocidad de rotación ($n^{1.5}$).

4.4.4 Pérdidas mecánicas.

Las pérdidas mecánicas en una máquina de cd son las pérdidas asociadas a los efectos mecánicos. Hay dos tipos básicos de pérdidas mecánicas: rozamiento propio y rozamiento con el aire. Las pérdidas por rozamiento propio son las causadas por la fricción de los rodamientos de la máquina, mientras que las pérdidas por rozamiento con el aire son las causadas por la fricción entre las partes móviles de la máquina y el aire encerrado en la estructura de hierro. Estas pérdidas varían con el cubo de la velocidad de rotación de la máquina.

4.4.5 Pérdidas dispersas (pérdidas misceláneas).

Las pérdidas dispersas son aquellas que no se pueden clasificar en algunas de las categorías indicadas anteriormente. No tiene importancia el cuidado con el que se contabilicen las pérdidas, pues casi siempre algunas quedan por fuera de las categorías mencionadas. Todas esas pérdidas se reúnen en las pérdidas misceláneas. Para la mayoría de las máquinas, las pérdidas misceláneas se toman convencionalmente como el 1% de la plena carga (potencia de entrada).

La eficiencia de una máquina de cd se define por:

$$\text{Potencia de salida } (P_{out}) = E_A I_A \quad 4-8$$

Donde:

E_A Voltaje de salida en terminales del generador en volts.

I_A Corriente de línea del generado en amperes.

$$\text{Potencia de entrada } (P_{in}) = \tau_{in} \omega_m \quad 4-9$$

Donde:

τ_{in} Par de entrada al generador en lb-in.

ω_m Velocidad mecánica del generador en revoluciones por minuto.

Finalmente la ecuación para calcular la eficiencia del generador es:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad 4-10$$

La diferencia entre la potencia de entrada y la de salida de la máquina son las pérdidas que ocurren en su interior.

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} \quad 4-11$$

4.5 Generador con excitación independiente.

Un generador de excitación separada es aquel cuya corriente de campo es suministrada por una fuente externa separada de voltaje. El circuito equivalente se muestra en la figura 4-2

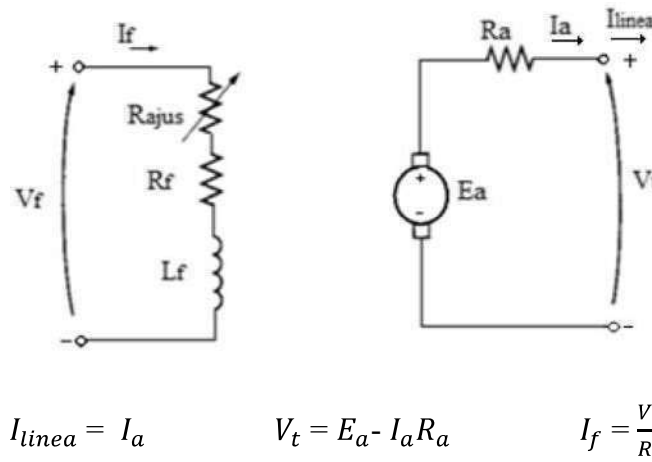


Fig. 4-2 Circuito equivalente del generador con excitación independiente.

En este circuito se ve que V_t representa el voltaje en terminales del generador, e I_{linea} representa la corriente que fluye en las líneas conectadas a las terminales. El voltaje

generado es E_a y la corriente de armadura es I_a . Es claro que la corriente de armadura es igual a la corriente de línea en un generador de excitación separada:

$$I_{linea} = I_a \quad 4-12$$

4.5.1 Comportamiento en terminales de un generador con excitación independiente.

La característica en terminales de un dispositivo es una gráfica de las cantidades de salida del dispositivo comparadas entre sí. En un generador de cd, las cantidades de salida son su voltaje en terminales y su corriente de línea. La característica en terminales de un generador con excitación separada es una gráfica de V_t contra I_{linea} a una velocidad constante en RPM.

Por la ley de voltaje de Kirchhoff, de la figura 4.2 el voltaje en terminales es:

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad 4-13$$

Donde:

V_t Voltaje en terminales en volts.

E_a Es el voltaje generado en volts.

$I_a R_a$ Caída de voltaje en la armadura en volts

4.5.2 Control de voltaje del generador en conexión independiente.

El voltaje en las terminales de un generador puede controlarse cambiando el voltaje interno generado E_a de la máquina. Según la ley de voltajes de Kirchhoff $V_t = E_a - I_a R_a$ de modo que si E_a aumenta, también aumentará V_t . Y por el contrario si E_a disminuye también disminuirá V_t .

Puesto que el voltaje interno generado E_a está dado por la ecuación $E_a = K\phi n$, hay dos formas posibles de controlar el voltaje de este generador:

1. **Cambio de la velocidad de rotación.** Si n aumenta, entonces E_a se incrementa por lo tanto V_t también aumenta. Si la velocidad se duplica, el voltaje se duplicará también.
2. **Cambio de la corriente de campo.** Si R_F disminuye, entonces aumenta la corriente de campo. En consecuencia, el flujo ϕ en la máquina aumenta. Como el flujo aumenta esto provoca que E_a y V_t aumenten. Si el flujo de campo magnético se incrementa, el voltaje se incrementa también en la misma proporción.

La velocidad de rotación está determinada por las características de la máquina primaria acoplada al generador y por cualquier engrane o banda de transmisión que se halle entre la máquina primaria y el generador.

En muchas aplicaciones, el rango de velocidad del motor primario es muy limitado; por tal razón el voltaje en las terminales se controla cambiando la corriente de campo. La polaridad del voltaje de salida depende de la dirección de rotación y de la dirección de la corriente de campo. Si no se tiene una carga eléctrica conectada al generador, no fluirá corriente y sólo habrá voltaje en la salida.

4.5.3 Características experimentales del comportamiento del generador en excitación independiente.

Para realizar esta conexión y todas las que se irán presentando sucesivamente se utilizará una máquina de cd como primotor, la cual tiene las siguientes condiciones nominales: 120W-1800 RPM-120V-1A y se encontrará impulsando al generador a una velocidad de 1800 RPM. Los parámetros que nos interesa conocer en esta conexión son: la carga conectada al generador en ohms (Ω), corriente de campo (I_f), corriente de carga que suministra el generador (I_L), voltaje en las terminales del generador (V_t). Todos estos

valores son manteniendo la velocidad (ω) del generador constante de 1800 RPM. La tabla 4-1 muestra los resultados obtenidos para esta conexión.

Carga (Ω)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
∞	0.4	0	1800	136.8
1200	0.4	0.11	1800	135.4
600	0.4	0.20	1800	133.3
300	0.4	0.42	1800	130.3
150	0.4	0.8	1800	123.5
120	0.4	0.96	1800	120.1
100	0.4	1.13	1800	117.2

Tabla 4-1 Resultados obtenidos en la excitación independiente

Como aparece en la tabla 4-1 en condiciones de vacío no se presenta corriente de línea ya que sólo existirá cuando se le conecte carga al generador, esta corriente dependerá de la carga conectada al generador. También se puede observar que aparece un voltaje de 136.8 V en las terminales de la máquina. La característica de corriente de línea contra el voltaje en terminales de los generadores de cd es la propiedad más importante. En la figura 4-3 se muestra esta característica de acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 4-1.

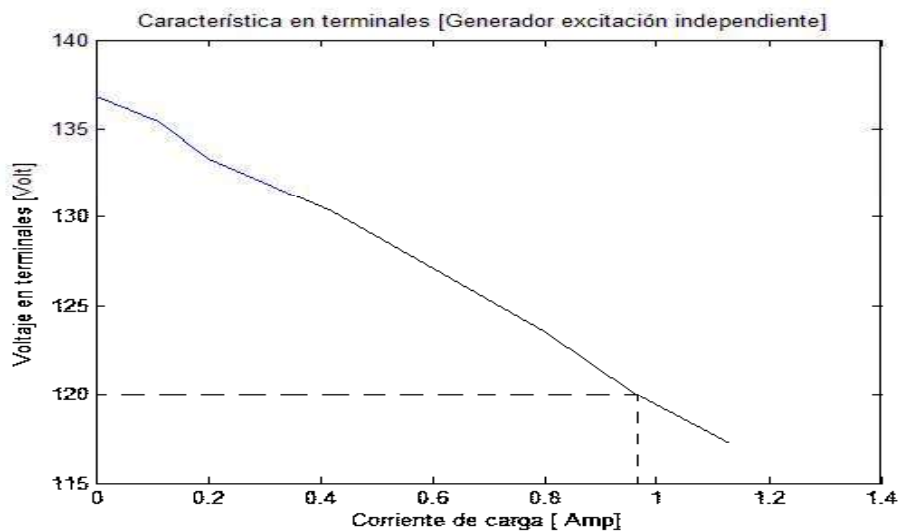


Fig. 4-3 Característica voltaje-corriente, excitación independiente.

En la tabla 4-1 y en la figura 4-3 se observa que el generador alcanza las condiciones nominales, de 1 ampere de corriente de línea y 120 V en terminales, al aplicarle una carga de 120 Ω , manteniendo la velocidad de 1800 RPM. Ahora en estas condiciones nominales, se obtiene de la tabla 4-1, la regulación de voltaje, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina.

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{136.8 \text{ V} - 120.1 \text{ V}}{120.1 \text{ V}} * 100 = 13\%$$

Esta regulación de voltaje de 13% indica que el generador presenta una caída de tensión significativa, al pasar de su condición de vacío a plena carga. Ahora la potencia de entrada y de salida es:

$$P_{in} = \frac{(\tau_{in})(\omega_m)(1.59)}{100,000} = \frac{(9 \text{ lbf-in})(1800 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} = 192 \text{ watts}.$$

$$P_{out} = E_A I_A = (120.1 \text{ V})(0.96 \text{ a}) = 115.2 \text{ watts}.$$

Ya conociendo la potencia de entrada y salida se pueden conocer las pérdidas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 192\text{w} - 115.2\text{w} = 76.8 \text{ watts}.$$

Las pérdidas obtenidas indican que existe una cantidad considerable de potencia de entrada disipada en el generador. Esto es debido a las pérdidas mecánicas, por fricción, calentamiento y pérdidas en los conductores de los devanados. Para conocer parte de las pérdidas presentadas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 4-1 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado de campo: } P_f = i_f^2 R_f = (0.4\text{a})^2 (278\Omega) = 44.48 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (0.96\text{a})^2 (14.9\Omega) = 13.73 \text{ watts}.$$

Estas pérdidas que se presentan en los devanados de campo y de armadura suman un total de 58.21 watts.

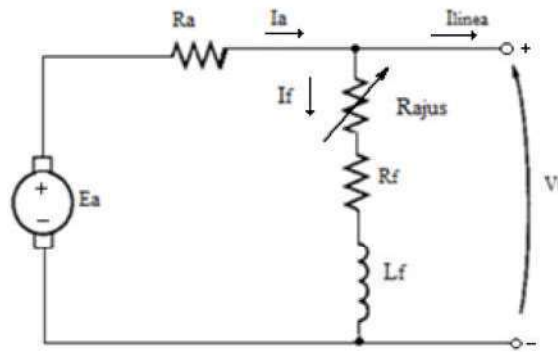
Se observa que estas pérdidas obtenidas son grandes y por lo tanto se reflejarán en la eficiencia de la máquina.

Debido a que se presentaron pérdidas de 76.8 watts, dichas pérdidas son grandes y esto provocará una eficiencia pequeña.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{115.2 \text{ watts}}{192 \text{ watts}} * 100 = 60\%$$

4.6 Generador de cd conexión shunt (derivación).

Un generador en conexión shunt es aquel que suministra su propia corriente de campo conectando su campo directamente a las terminales de la máquina. El circuito equivalente de un generador en conexión shunt es el que se muestra en la figura 4-4.



$$I_a = I_F + I_L \quad V_t = E_a - I_a R_a \quad I_f = \frac{V_t}{R_f}$$

Fig. 4-4 Circuito equivalente de un generador shunt.

En este tipo de conexión la corriente de la armadura de la máquina alimenta tanto al circuito de campo como a la carga conectada a la máquina:

$$I_a = I_F + I_L \quad 4-10$$

Y la ecuación correspondiente a la ley de voltaje de Kirchhoff para el circuito del inducido de esta máquina es:

$$V_T = E_a + I_a R_a \quad 4-11$$

4.6.1 Aumento de voltaje en un generador shunt.

Si el generador shunt no tiene carga conectada a él y el motor primario comienza a girar el eje del generador, ¿Cómo aparece el voltaje inicial en las terminales de la máquina? El aumento de voltaje en un generador dc depende de la presencia de un flujo residual en los polos del generador.

Cuando un generador empieza a girar, se genera un voltaje interno dado por:

$$E_a = K \phi_{res} n \quad 4-12$$

Donde:

E_a Voltaje generado en volts.

K Constante que depende de las características de fábrica.

ϕ_{res} Flujo residual en webers.

n Velocidad de rotación en RPM.

Este voltaje aparece en las terminales del generador (pueden ser unos cuantos volts). La aparición de ese voltaje en las terminales causa un flujo de corriente en la bobina de campo del generador. Esta corriente de campo produce una fuerza magnetomotriz en los polos que incrementa el flujo en ellos, el cual aumenta E_a , que en su turno incrementa el voltaje en sus terminales (V_T). Cuando se eleva V_T , la corriente de campo se eleva aún más, aumentando más el flujo ϕ_{res} y este incrementa E_a , etc.

4.6.2 Control de voltaje del generador en conexión shunt.

Al igual que en el generador de excitación separada, existen dos maneras de controlar el voltaje de un generador shunt.

1. Cambio de la velocidad del eje del generador.
2. Cambio de la resistencia de campo del generador y, por tanto, cambiando la corriente de campo.

El cambio de la resistencia de campo es el principal método utilizado para controlar el voltaje en las terminales de los generadores reales en conexión shunt.

Si la resistencia de campo R_f disminuye, entonces la corriente de campo I_f aumenta. Cuando la corriente de campo I_f se incrementa, el flujo de la máquina aumenta y origina un incremento en el voltaje interno generado E_a . El aumento en E_a causa que el voltaje en las terminales V_t también aumente.

4.6.3 Características experimentales del comportamiento del generador en conexión shunt.

Los parámetros que interesan conocer en esta conexión shunt son: la carga conectada al generador en ohms (Ω), corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de carga que suministra el generador (I_L), voltaje en las terminales del generador (V_t). En esta conexión la corriente de armadura no es la misma que la corriente de línea como en la conexión de excitación independiente. Todos estos valores son manteniendo la velocidad del generador (ω) constante de 1800 RPM. La tabla 4-2 muestra los resultados obtenidos en la conexión shunt.

Carga (Ω)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
∞	0.4	0.4	0	1800	129.5

1200	0.5	0.4	0.12	1800	128.6
600	0.58	0.38	0.21	1800	125.3
300	0.75	0.36	0.4	1800	118
150	1.01	0.32	0.7	1800	105.1
120	1.11	0.3	0.82	1800	99
100	1.17	0.28	0.91	1800	91.8

Tabla 4-2 Resultados obtenidos en la conexión shunt.

Como aparece en la tabla 4-2 en condiciones de vacío no se presenta corriente de línea ya que sólo existirá cuando se le conecte carga al generador. También se puede observar que aparece un voltaje de 129.5 V en las terminales de la máquina, en condiciones de vacío o sin carga. Se observa que el voltaje disminuye de una manera más significativa que en la conexión excitación independiente. La característica de corriente de línea contra el voltaje en terminales de los generadores de cd es la propiedad más importante. Y en la figura 4-5 se muestra esta característica de acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 4-2.

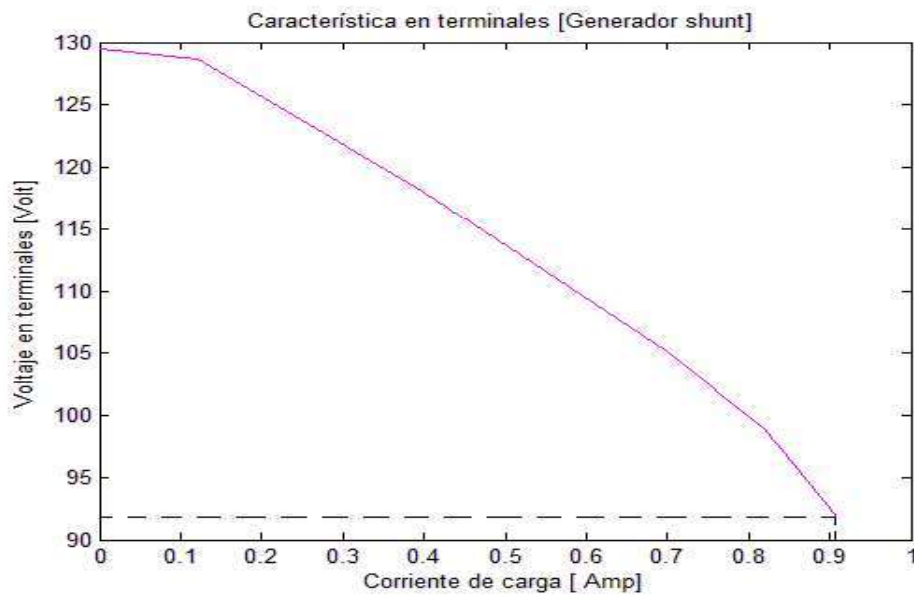


Fig. 4-5 Característica voltaje-corriente, conexión shunt.

Como se puede apreciar en la tabla 4-2 y en la figura 4-5, lo más que se puede acercar a las condiciones nominales del generador fue a una corriente de línea de 0.91 *amp* y a un voltaje de salida de 91.8V, al aplicarle una carga de 100 Ω . Todo esto manteniendo la velocidad de 1800 RPM. Basándonos en estas condiciones, se puede conocer de la tabla 4-2, la regulación de voltaje, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina. Esto es:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{129.5 \text{ V} - 91.8 \text{ V}}{91.8 \text{ V}} * 100 = 41\%$$

Esta regulación de voltaje de 41% indica que el generador tiene una caída de tensión grande al pasar de su condición de vacío a plena carga, es una regulación de velocidad mayor comparada con la conexión en excitación independiente. Ahora la potencia de entrada y de salida son respectivamente:

$$P_{in} = \frac{(\tau_{in})(\omega_m)(1.59)}{100,000} = \frac{(8 \text{ lbf-in})(1800 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} = 170.8 \text{ watts}.$$

$$P_{out} = E_A I_A = (91.8 \text{ V})(0.91 \text{ a}) = 83.5 \text{ watts}.$$

Ya conociendo la potencia de entrada y salida se pueden conocer las pérdidas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 170.8 \text{ w} - 83.5 \text{ w} = 87.3 \text{ watts}.$$

Las pérdidas obtenidas son altas respecto a la potencia de salida del generador, y por lo tanto el generador presentará una baja eficiencia. Dichas pérdidas obtenidas indican que existe una cantidad considerable de potencia de entrada disipada en el generador. Esto es debido a las pérdidas mecánicas, por fricción, calentamiento y pérdidas en los conductores de los devanados. Para conocer parte de las pérdidas presentadas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 4-2 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado de campo: } P_f = i_f^2 R_f = (0.28 \text{ a})^2 (278 \Omega) = 21.79 \text{ watts}.$$

Pérdidas en el devanado de armadura: $P_a = i_a^2 R_a = (1.17a)^2 (14.9\Omega) = 20.39 \text{ watts}$.

Estas pérdidas que se presentan en los devanados de campo y de armadura suman un total de 42.18 watts .

Como último dato conoceremos la eficiencia del generador shunt.

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{83.5 \text{ watts}}{170.8 \text{ watts}} * 100 = 48\%$$

Puesto que las pérdidas afectan al generador, da como resultado una eficiencia de 48% lo cual indica que es una máquina que presenta poca eficiencia. Esta eficiencia es aún menor que la eficiencia del generador con excitación independiente.

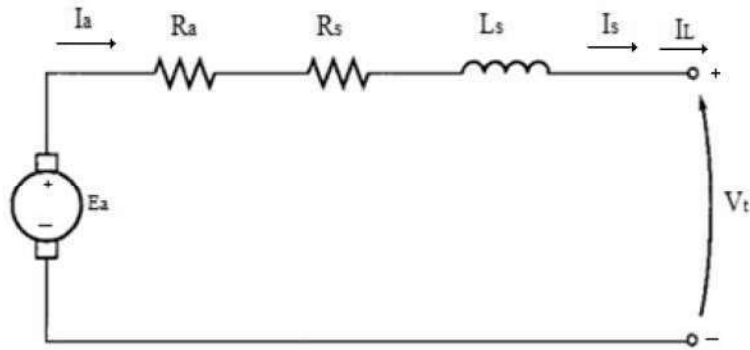
4.7 Generador de cd conexión serie.

Llámesese generador serie aquel cuyo devanado de campo se conecta en serie con el devanado de armadura. La corriente de excitación que pasa por el devanado de campo de un generador serie, es la misma corriente que la que el generador proporciona a la carga. Si la carga tiene una resistencia alta, sólo se podrá generar un voltaje de salida mínimo debido a la corriente de campo mínima. Puesto que la armadura tiene una corriente mucho mayor que un campo en derivación, el campo serie en un generador de esta clase tendrá sólo unas pocas vueltas de alambre y el conductor utilizado será mucho más grueso que el de un campo en derivación. Puesto que la fuerza magnetomotriz esta dada por la ecuación $\mathcal{F} = NI$, unas pocas vueltas con alta corriente pueden producir una fuerza magnetomotriz igual a la producida por muchas vueltas con baja corriente.

Un campo serie se diseña para que tenga la más baja resistencia posible, dado que la corriente de plena carga fluye a través de él. En un circuito abierto, el generador tendrá sólo un mínimo de voltaje de salida, debido a su magnetismo remanente. Si la carga toma más corriente, entonces la corriente de excitación aumenta, el campo magnético se hace más intenso y el generador produce un voltaje de salida mayor.

Por lo tanto, en un generador en serie, los cambios en la corriente de carga afectan enormemente al voltaje de salida del generador. La figura 4-4 muestra la conexión serie.

$(N_s \text{ espiras})$



$$I_a = I_s = I_{linea} \quad V_T = E_a - I_a(R_a + R_s)$$

Fig. 4-6 Circuito equivalente del generador serie.

Como se trata de una conexión serie, la corriente de armadura I_a es igual a la corriente serie I_{se} y por lo tanto a la corriente de línea I_{linea} . Conviene reconocer que en un generador en serie se presentan dos caídas de voltajes principales entre el voltaje generado E_a y voltaje entre terminales V_t .

Por lo tanto la ecuación de voltaje en terminales del generador serie es:

$$V_t = E_a - I_a(R_a + R_s) \quad 4-13$$

Donde:

V_t Voltaje en terminales

E_a Es el voltaje generado.

$I_a = I_s$ Corriente de armadura o corriente serie.

R_a La resistencia de armadura R_a incluye las escobillas junto con los campos de conmutación y quizás los devanados de compensación.

R_s Incluye la resistencia del campo serie, que puede estar en paralelo con un divisor en serie.

El generador en serie siempre tiene una regulación negativa de voltaje si opera en su rango nominal. El voltaje de salida es entonces menor para una carga pequeña que para una grande, si está dentro de su rango.

4.7.1 Comportamiento en terminales de un generador serie.

En vacío en una conexión serie no hay corriente de campo I_f por lo tanto V_t se reduce a un nivel pequeño dado por el flujo residual de la máquina. Cuando aumenta la carga, aumenta la corriente de campo I_f y V_t se eleva con rapidez. Aunque la caída $I_a(R_a + R_s)$ también aumenta, al principio el aumento en E_a es más rápido que la caída $I_a(R_a + R_s)$ en consecuencia V_t aumenta. Al poco rato, la máquina se aproxima a la saturación y E_a llega a ser casi constante. En ese punto, la caída resistiva es el efecto predominante, y V_t comienza a caer.

4.7.2 Características experimentales del comportamiento del generador serie.

Los parámetros que interesan conocer en esta conexión serie son: la carga conectada al generador en ohms (Ω), corriente de armadura (I_a) que es la misma que la corriente de carga que suministra el generador (I_L), voltaje en las terminales del generador (V_t). Todos estos valores son manteniendo la velocidad del generador constante de 1800 RPM. La tabla 4-3 muestra los resultados obtenidos en la conexión serie.

Carga (Ω)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
∞	0	1800	7.25
171.4	0.040	1800	7.28
85.7	0.090	1800	7.47
57.1	0.130	1800	7.66
42.8	0.180	1800	7.9
34.2	0.240	1800	8.12
28.5	0.290	1800	8.43

24.4	0.350	1800	8.76
21.4	0.410	1800	9.08
19	0.490	1800	9.62
17.1	0.570	1800	9.95
15.5	0.650	1800	10.31
14.2	0.840	1800	12.12

Tabla 4-3 Resultados obtenidos en la conexión serie.

Como aparece en la tabla 4-3 en condiciones de vacío no se presenta corriente de línea ya que sólo existirá cuando se le conecte carga al generador. Aunque ésta corriente empieza a aumentar, pero lo hace en muy pequeñas cantidades como se observa. También se puede observar que aparece un voltaje muy pequeño de 7.25 V en las terminales de la máquina, debido al flujo residual en los polos de la máquina. Se observa que el voltaje empieza a incrementarse cuando la carga toma más corriente, entonces la corriente de excitación aumenta y el campo magnético se hace más intenso y el generador produce un voltaje de salida mayor. La característica de corriente de línea contra el voltaje en terminales del generador en conexión serie se muestra en la figura 4-7, de acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 4-3.

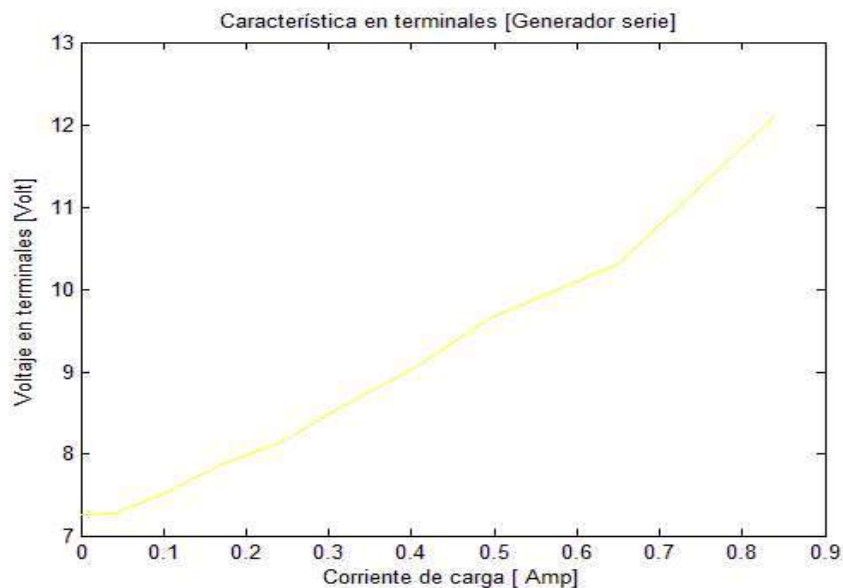


Fig. 4-7 Característica voltaje-corriente, conexión serie.

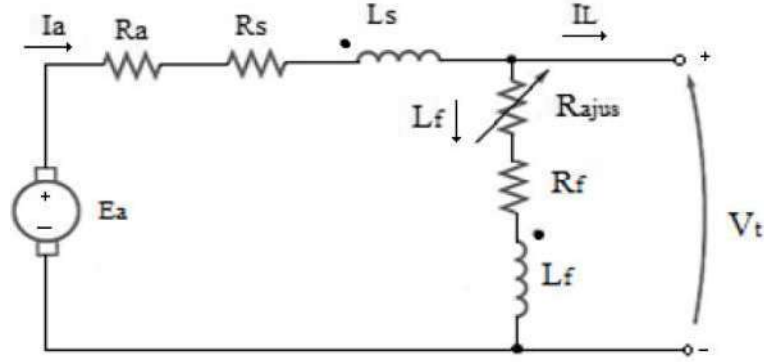
Como se observa en la figura 4-7, la curva empieza en 7.25 V que es el voltaje residual del generador, y empieza a crecer conforme la corriente de línea va tomando mayor magnitud. Esta corriente de línea es muy pequeña, se encuentra en la escala de mA y no se alcanzan las condiciones nominales del generador, por otra parte el voltaje en terminales aumenta muy parecido a la corriente en un rango de 7 V a 12 V, también por esta parte no se alcanzó su voltaje nominal del generador que es de 120 V. Por lo tanto no se pueden conocer sus características de regulación de voltaje, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina, ya que para ello se necesita operar al generador en sus condiciones nominales.

4.8 Generador compuesto.

Un generador compuesto es una máquina de cd que contiene campos tanto en serie como en derivación. Como es de esperarse, el generador compuesto tiene una combinación de características del generador en derivación y del generador serie. La máquina compuesta usual tiene más ampere-vueltas en el campo en derivación que en el campo en serie. Sin embargo tiene las suficientes para producir cierta elevación de voltaje al aumentar la carga. Si el campo en derivación se conecta entre la armadura y el campo en serie, entonces está conectado en **derivación corta**. Si el campo en derivación se conecta en el lado de la alimentación del campo en serie, se dice que está en **derivación larga**. En realidad ninguna de las dos conexiones tiene ventaja sobre la otra.

4.8.1 Generador compuesto acumulativo.

Un generador cd compuesto acumulativo es un generador de cd con campo en serie y campo en derivación, conectados de tal manera que las fuerzas magnetomotrices de los dos campos se sumen. La figura 4-5 muestra el circuito equivalente de un generador cd compuesto acumulativo en conexión de "derivación larga". Los puntos que aparecen en la bobina de campo tienen el mismo significado que los puntos sobre un transformador: la corriente que fluye hacia dentro de las bobinas por el extremo marcado con punto produce una fuerza magnetomotriz positiva. El circuito equivalente de la conexión compuesta acumulativa larga se muestra en la figura 4-8.



$$I_a = I_f + I_L \quad V_T = E_a - I_a(R_a + R_s) \quad I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad \mathcal{F}_{net} = N_f \mathcal{F}_F + N_s I_a - \mathcal{F}_{AR}$$

Fig. 4-8 Circuito equivalente del generador en conexión compuesto acumulativa larga.

Nótese que la corriente de armadura fluye hacia adentro por el extremo de la bobina de campo serie marcado con punto y que la corriente de campo en derivación fluye hacia adentro por el extremo de la bobina de campo en derivación marcado con punto. Entonces la fuerza magnetomotriz total de esta máquina está dada por:

$$\mathcal{F}_{net} = \mathcal{F}_F + \mathcal{F}_S - \mathcal{F}_{AR} \quad 4-14$$

Donde:

$\mathcal{F}_F$ Es la fuerza magnetomotriz del campo en derivación.

$\mathcal{F}_S$ Es la fuerza magnetomotriz del campo serie.

$\mathcal{F}_{AR}$ Es la fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura.

La corriente equivalente efectiva del campo en derivación de esta máquina está dada por:

$$N_F I_F^* = N_F I_F + N_S I_A - \mathcal{F}_{AR} \quad 4-15$$

$$I_F^* = I_F + \frac{N_S}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F} \quad 4-16$$

Las otras relaciones de voltaje y corriente para este generador son:

$$I_A = I_F + I_L \quad 4-17$$

$$V_T = E_a - I_A(R_A + R_S) \quad 4-18$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad 4-19$$

Otra forma de acoplar un generador compuesto acumulativo es la conexión en "derivación corta", donde el campo serie está fuera del circuito de campo en derivación y tiene una corriente de I_L que fluye a través de el I_A . A continuación en la figura 4-9 se muestra un generador cd compuesto acumulativo en derivación corta.

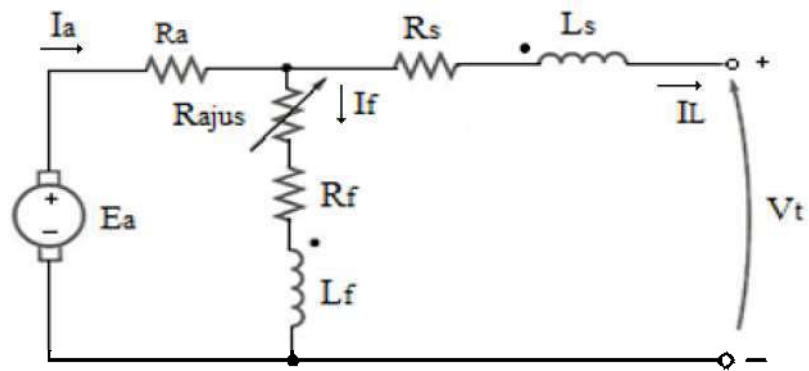


Fig. 4-9 Circuito equivalente del generador en conexión compuesto acumulativa corta.

4.8.2 Comportamiento en las terminales de un generador compuesto acumulativo.

Para entender las características en las terminales de un generador compuesto acumulativo, es necesario comprender los efectos que actúan dentro de la máquina.

Si aumenta la carga sobre el generador, entonces la corriente de carga I_L aumenta. Puesto que I_L aumenta, la corriente de armadura I_A también aumenta. En este punto ocurren dos efectos en el generador:

1. Como se eleva I_A , la caída de voltaje $I_A(R_A + R_S)$ aumenta. Esto tiende a causar una disminución de voltaje en las terminales.

2. Cuando aumenta I_A , la fuerza magnetomotriz del campo serie $\mathcal{F}_{SE} = N_S I_A$ aumenta. Esto incrementa la fuerza magnetomotriz total $\mathcal{F}_{tot} = \mathcal{F}_F + \mathcal{F}_S$, la cual aumenta el flujo en el generador. El incremento del flujo en el generador eleva E_a , que a su vez tiende a hacer que el voltaje en terminales aumente.

Estos dos efectos se oponen entre sí, pues uno tiende a aumentar V_t y el otro, a disminuirlo. ¿Cuál efecto predomina en una máquina dada? Todo depende de cuántas vueltas en serie tengan los polos de la máquina. La pregunta puede ser respondida tomando varios casos individuales:

1. **Pocas espiras en serie (N_S pequeño).** Si hay sólo unas pocas espiras en serie, predomina el efecto de la caída resistiva de voltaje. El voltaje cae como en un generador en derivación, pero no en forma tan abrupta. Este tipo de construcción, donde el voltaje en las terminales a plena carga es menor que el vacío, se llama hipocompuesto(o compuesto parcial).
2. **Más espiras en serie (N_S mayor).** Si hay mayor cantidad de espiras de alambre en serie sobre los polos, al comienzo predomina el efecto de fortalecimiento del flujo y el voltaje en las terminales aumenta con la carga. Sin embargo, cuando la carga continúa aumentando, se crea saturación magnética y la caída resistiva es más fuerte que el efecto de aumento de flujo. En tal máquina, el voltaje en las terminales aumenta primero y luego cae, cuando la carga aumenta. Si V_T en vacío es igual a V_T a plena carga, el generador se denomina generador compuesto plano.
3. **Se añaden aún más espiras en serie (N_S grande).** Si se añaden aún más espiras en serie al generador, el efecto del fortalecimiento del flujo predomina un tiempo más prolongado antes de que predomine la caída resistiva. El resultado es una característica cuyo voltaje en las terminales a plena carga supera el correspondiente en vacío. Si V_T a plena carga excede a V_T en vacío, el generador se denomina generador hipercompuesto. Estas 3 posibilidades se muestran en la figura 4-10.

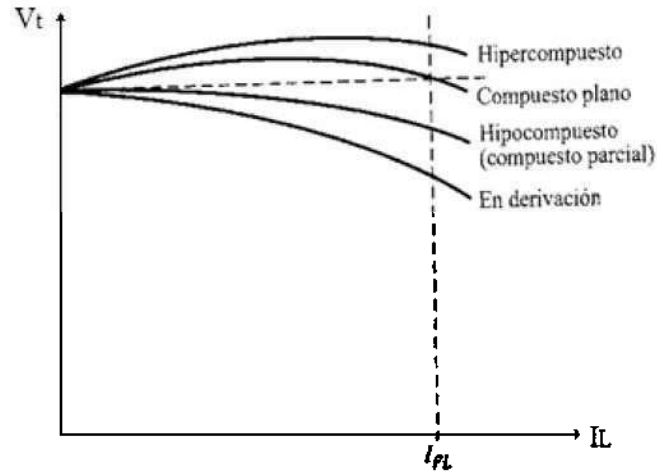


Fig. 4-10 Características en terminales del generador cd, compuesto acumulativo

También es posible reunir todas estas características de voltaje en un solo generador si se utiliza una resistencia de desviación. La figura 4.11 muestra un generador cd compuesto acumulativo con un número relativamente grande de espiras en serie y una resistencia de desviación conectada alrededor del campo serie.

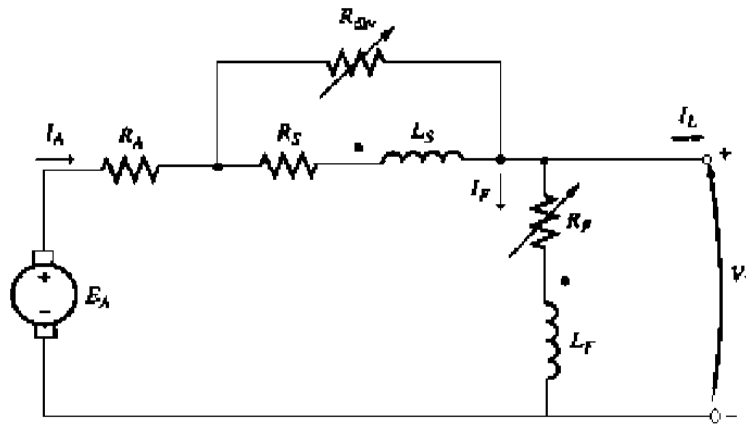


Fig. 4-11 Generador cd compuesto acumulativo con resistencia de desviación.

- Si la resistencia R_{div} se ajusta a un valor grande, la mayoría de la corriente de armadura fluye a través de la bobina del campo serie y el generador es hipercompuesto.
- Si la resistencia R_{div} se ajusta a un valor pequeño, la mayoría de la corriente fluye por fuera de la bobina del campo serie, a través de R_{div} y el generador es

hipocompuesto. Se puede ajustar uniformemente con la resistencia para obtener la cantidad de compuesto deseada.

4.8.3 Control de voltaje en generadores compuestos acumulativos.

Las técnicas disponibles para controlar un generador cd compuesto acumulativo son las mismas que se utilizan para controlar el voltaje de los generadores en derivación.

1. Cambio de la velocidad de rotación. Si n aumenta, entonces E_a también aumenta, por lo tanto V_t se incrementará.
2. Cambio en la corriente de campo. Una disminución en R_F causa que I_F aumente, lo que incrementa la fuerza magnetomotriz total del generador. Como $\mathcal{F}_{tot}$ aumenta, el flujo ϕ de la máquina aumenta y E_a se eleva. Finalmente un aumento en E_a eleva V_T .

4.8.4 Características experimentales del comportamiento del generador compuesto en conexión acumulativa larga.

Los parámetros que interesan conocer en esta conexión son: la carga conectada al generador en ohms (Ω), corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de carga que suministra el generador (I_L), voltaje en las terminales del generador (V_t). Todos estos valores son manteniendo la velocidad del generador constante de 1800 RPM. La tabla 4-4 muestra los resultados obtenidos en la conexión.

Carga (Ω)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
∞	0.31	0.28	0	1800	130
1200	0.41	0.28	0.10	1800	128.6
600	0.50	0.28	0.20	1800	127.4
300	0.70	0.27	0.40	1800	125.1
150	1.06	0.27	0.78	1800	123.2

120	1.26	0.27	1	1800	120
100	1.38	0.25	1.10	1800	114

Tabla 4-4 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa larga.

Como aparece en la tabla 4-4 en condiciones de vacío no se presenta corriente de línea ya que sólo existirá cuando se le conecte carga al generador, y por lo tanto el generador se comporta como un generador shunt. También aparece un voltaje grande en condiciones de vacío, pero conforme va aumentando la corriente de línea, éste voltaje comienza a disminuir debido a las caídas internas del circuito equivalente, pero no es tan rápida la caída como en el generador shunt debido a que el campo serie se va incrementando con la corriente de línea y esto produce un flujo magnético que permite que el voltaje no caiga tan drásticamente. La característica de corriente de línea contra el voltaje en terminales del generador se muestra en la figura 4-12, de acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 4-4.

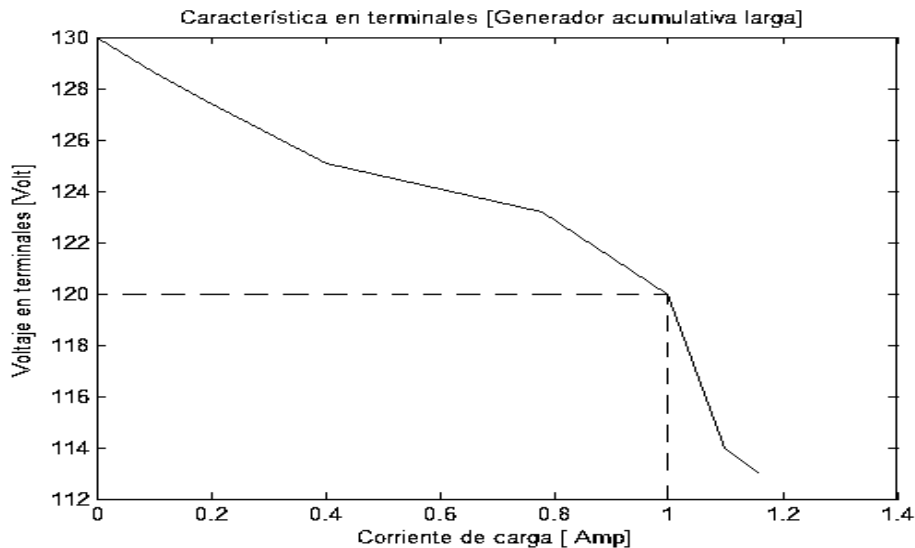


Fig. 4-12 Característica voltaje-corriente, conexión acumulativa larga.

Como se puede apreciar en la tabla 4-4 y en la figura 4-12, las condiciones nominales del generador se alcanzan con una carga de $120\ \Omega$ conectados al generador, la cual genera una corriente de línea de $1\ \text{amp}$ y $120\ \text{V}$ en terminales. Que son las condiciones nominales del generador. Ahora con estas condiciones nominales, se pueden

conocer la regulación de voltaje, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{130 \text{ V} - 120 \text{ V}}{120 \text{ V}} * 100 = 8\%$$

Esta regulación de voltaje de 8% indica que el generador compuesto en conexión acumulativa larga presenta una mejor regulación de voltaje con respecto a los generadores excitación independiente y shunt que presentaban regulaciones de 13% y 41% respectivamente. Lo cual indica que no existe una caída de tensión grande al pasar de su condición de vacío a plena carga. Ahora la potencia de entrada y de salida son respectivamente:

$$P_{in} = \frac{(\tau_{in})(\omega_m)(1.59)}{100,000} = \frac{(12.5 \text{ lbf-in})(1800 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} = 266.8 \text{ watts}.$$

$$P_{out} = E_A I_A = (120 \text{ V})(1 \text{ a}) = 120 \text{ watts}.$$

Ya conociendo la potencia de entrada y salida se pueden conocer las pérdidas en la máquina:

$$P_{\text{pérdidas}} = P_{in} - P_{out} = 266.8 \text{ w} - 120 \text{ w} = 146.8 \text{ watts}.$$

Estas pérdidas son grandes y gran potencia de entrada se pierde en el interior de la máquina. Para conocer parte de las pérdidas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado serie, shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 4-4 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado serie: } P_s = i_s^2 R_s = (1 \text{ a})^2 (1.6 \Omega) = 1.6 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (1.26 \text{ a})^2 (14.9 \Omega) = 23.65 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado shunt: } P_f = i_f^2 R_f = (0.27 \text{ a})^2 (278 \Omega) = 20.26 \text{ watts}.$$

Estas pérdidas que se presentan en el devanado serie, armadura y shunt suman un total de 45.51 watts.

Estas pérdidas obtenidas en los conductores de la máquina son grandes por lo tanto provocarán una menor eficiencia. Como último dato conoceremos la eficiencia del generador.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{120 \text{ watts}}{226.8 \text{ watts}} * 100 = 52\%$$

Puesto que las pérdidas afectan al generador, nos da como resultado una eficiencia de 52% lo cual nos indica que es una máquina que presenta poca eficiencia comparada con el generador en excitación independiente.

4.8.5 Características experimentales del comportamiento del generador compuesto en conexión acumulativa corta.

Para el generador compuesto en conexión acumulativa corta los parámetros que nos interesa conocer son los mismos que en la conexión acumulativa larga: carga conectada al generador en ohms (Ω), corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de carga que suministra el generador (I_L), voltaje en las terminales del generador (V_t). Todos estos valores son manteniendo la velocidad del generador constante de 1800 RPM. La tabla 4-5 muestra los resultados obtenidos en la conexión.

Carga (Ω)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω RPM	V_t (V)
∞	0.42	0.42	0	1800	134
1200	0.52	0.41	0.12	1800	131.6
600	0.63	0.40	0.22	1800	129.5
300	0.81	0.39	0.43	1800	127.2
150	1.19	0.38	0.81	1800	122.7
120	1.35	0.37	0.99	1800	120
100	1.51	0.36	1.15	1800	118.4

Tabla 4-5 Resultados obtenidos en la conexión compuesta acumulativa corta.

Como aparece en la tabla 4-5 en condiciones de vacío no se presenta corriente de línea ya que sólo se presentará cuando se conecte la carga al generador, y mientras tanto el generador se comporta como generador shunt. Y al igual que en la conexión acumulativa larga, en la conexión acumulativa corta también aparece un voltaje grande en condiciones de vacío, pero conforme va aumentando la corriente de línea, éste voltaje comienza a disminuir, ésta disminución no es tan rápida como en el generador shunt debido a que el campo serie también se va incrementando conforme aumenta la corriente de línea y esto produce un flujo magnético que permite que el voltaje no caiga tan drásticamente. La conexión acumulativa larga y corta son muy parecidas una de la otra y por lo tanto no existen grandes diferencias entre ellas. La característica de corriente de línea contra el voltaje en terminales del generador se muestra en la figura 4-13, de acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 4-5.

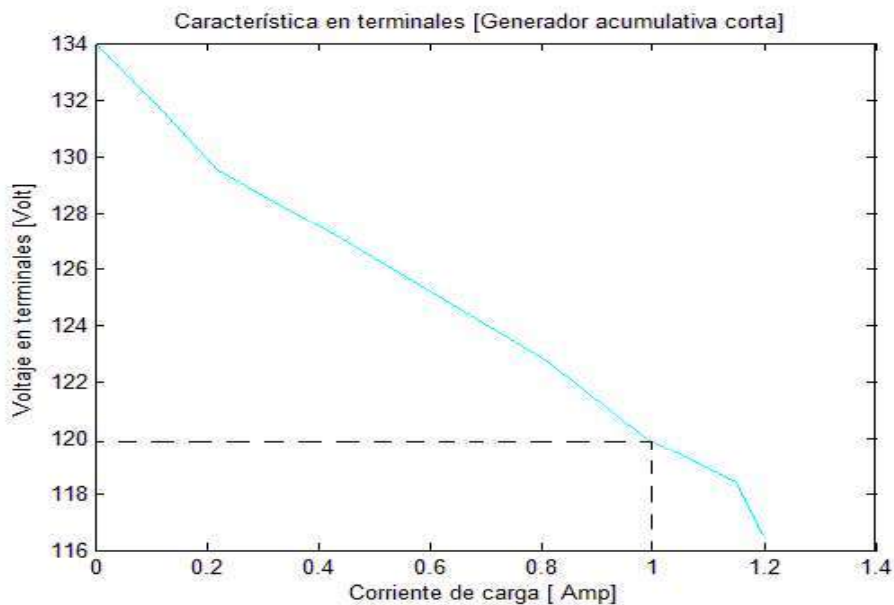


Fig. 4-13 Característica voltaje-corriente, conexión acumulativa corta.

Como podemos apreciar en la tabla 4-5 y en la figura 4-13, las condiciones nominales del generador se alcanzan con una carga de $120\ \Omega$ conectados al generador, la cual nos produce una corriente de línea de 0.99 amp y 120 V en terminales. Que son las condiciones nominales del generador. Ahora con estas condiciones nominales, se pueden

conocer la regulación de voltaje, la potencia de entrada, potencia de salida, las pérdidas y por último la eficiencia de la máquina. Esto es:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{pc}}{V_{pc}} = \frac{134 \text{ V} - 120 \text{ V}}{120 \text{ V}} * 100 = 11\%$$

Esta regulación de voltaje de 11% indica que el generador compuesto en conexión acumulativa corta no tiene tan buena regulación de voltaje como en la conexión larga. Lo cual indica que existe una caída de tensión un poco más grande al pasar de su condición de vacío a plena carga, aunque. Ahora la potencia de entrada y de salida son respectivamente:

$$P_{in} = \frac{(\tau_{in})(\omega_m)(1.59)}{100,000} = \frac{(13 \text{ lbf-in})(1800 \text{ RPM})(1.59)}{100,000} = 277.5 \text{ watts}.$$

$$P_{out} = E_A I_A = (120 \text{ V})(0.99 \text{ a}) = 118 \text{ watts}.$$

Ya conociendo la potencia de entrada y salida se pueden conocer las pérdidas en la máquina:

$$\text{Pérdidas} = P_{in} - P_{out} = 277.5 \text{ w} - 118 \text{ w} = 159.5 \text{ watts}.$$

Estas pérdidas son grandes y gran potencia de entrada se pierde en el interior de la máquina. Para conocer parte de las pérdidas en el interior de la máquina se calcularán las pérdidas en el cobre del devanado serie, shunt y el devanado de armadura. Como ya antes se dieron a conocer las resistencias de cada uno de los devanados de la máquina de cd y partiendo de la Tabla 4-5 para conocer las corrientes en cada devanado en las condiciones nominales de operación de la máquina. Se procede a obtener dichas pérdidas:

$$\text{Pérdidas en el devanado serie: } P_s = i_s^2 R_s = (0.99 \text{ a})^2 (1.6 \Omega) = 1.56 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado de armadura: } P_a = i_a^2 R_a = (1.35 \text{ a})^2 (14.9 \Omega) = 27.15 \text{ watts}.$$

$$\text{Pérdidas en el devanado shunt: } P_f = i_f^2 R_f = (0.37 \text{ a})^2 (278 \Omega) = 38 \text{ watts}.$$

Estas pérdidas que se presentan en el devanado serie, armadura y shunt suman un total de 66.71 watts.

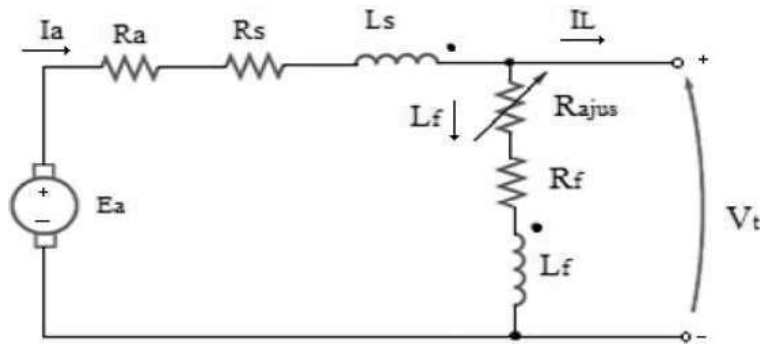
Las pérdidas obtenidas en ésta conexión son altas, lo cual se reflejará en la eficiencia del generador. Como último dato conoceremos la eficiencia del generador.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{118 \text{ watts}}{277.5 \text{ watts}} * 100 = 42\%$$

Puesto que las pérdidas afectan al generador, ésto da como resultado una eficiencia de 42% lo cual indica que es una máquina que presenta poca eficiencia

4.8.6 Generador compuesto diferencial.

Un generador cd compuesto diferencial es un generador con dos campos, el campo en derivación y el campo en serie, pero sus fuerzas magnetomotrices se restan. En un generador cd compuesto diferencial la corriente de armadura está fluyendo hacia afuera de la bobina por el extremo marcado con punto, mientras que la corriente del campo en derivación está fluyendo hacia dentro por el extremo de la bobina marcado con punto. En la figura 4-14 se muestra el circuito equivalente de un generador cd compuesto diferencial.



$$I_a = I_F + I_L \quad V_T = E_a - I_a(R_a + R_s) \quad I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad \mathcal{F}_{net} = N_f \mathcal{F}_F + N_s I_a - \mathcal{F}_{AR}$$

Fig. 4-14 Circuito equivalente de un generador compuesto diferencial larga.

En esta máquina, la fuerza magnetomotriz neta es

$$\mathcal{F}_{net} = \mathcal{F}_F - \mathcal{F}_S - \mathcal{F}_{AR} \quad 4-20$$

$$\mathcal{F}_{net} = N_F I_F - N_S I_A - \mathcal{F}_{AR} \quad 4-21$$

Y la corriente equivalente de campo en derivación debida al campo serie y a la reacción de armadura está dada por:

$$I_{eq} = -\frac{N_S}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F} \quad 4-22$$

La corriente total efectiva de campo en derivación en esta máquina es:

$$I_F^* = I_F + I_{eq} \quad 4-23$$

$$I_F^* = I_F - \frac{N_S}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F} \quad 4-24$$

Como el generador compuesto acumulativo, el generador compuesto diferencial puede ser conectado en derivación larga o en derivación corta, como se muestra en la figura 4-15.

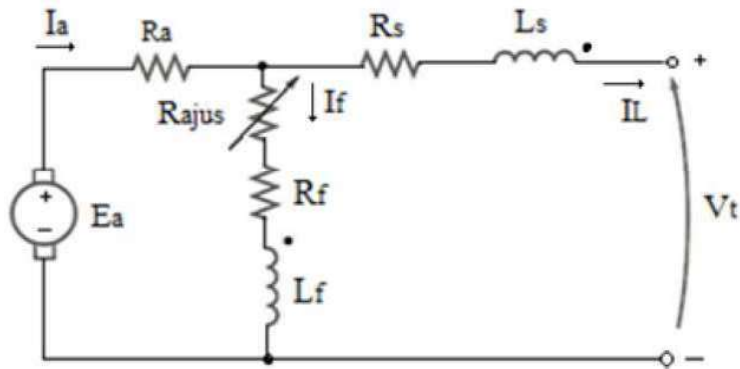


Fig. 4-15 Circuito equivalente de un generador compuesto diferencial corta.

4.8.7 Comportamiento en las terminales de un generador compuesto diferencial.

En el generador cd compuesto diferencial ocurren los mismos dos efectos que se presentaron en el generador cd compuesto acumulativo. Esta vez, sin embargo, ambos efectos actúan en la misma dirección. Ellos son:

1. Cuando aumenta I_A aumenta también la caída de voltaje $I_A(R_A + R_S)$. Este aumento tiende a causar una disminución en el voltaje en terminales V_T .
2. Cuando se incrementa I_A , la fuerza magnetomotriz del campo serie $\mathcal{F}_{SE} = N_S I_A$ también aumenta. Este aumento en la fuerza magnetomotriz del campo serie reduce la fuerza magnetomotriz neta del generador $\mathcal{F}_{tot} = N_F I_F - N_S I_A$, que a su vez, reduce el flujo neto ϕ en el generador. Una disminución del flujo disminuye a E_a lo que a su vez disminuye a V_T .

Puesto que ambos efectos tienden a disminuir V_T , el voltaje cae drásticamente cuando se aumenta la carga en el generador. En la figura 4-16 se muestra la característica típica en las terminales de un generador cd compuesto diferencial.

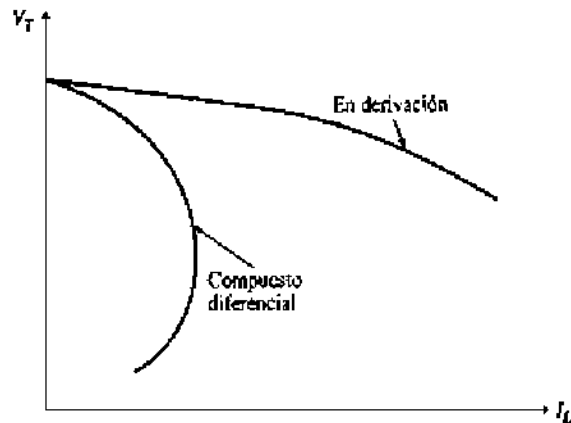


Fig. 4-16 Características en las terminales de un generador cd compuesto diferencial.

4.8.8 Control de voltaje en generadores compuestos diferenciales.

Aunque las características de caída de voltaje en un generador cd compuesto diferencial son bastante malas, es posible ajustar el voltaje en las terminales para una carga dada. Las técnicas disponibles para ajustar el voltaje en las terminales son las mismas empleadas en los generadores cd en derivación y compuestos acumulativos.

1. Cambio de la velocidad de rotación (n). Si n aumenta, entonces E_a también aumenta, por lo tanto V_t se incrementará.
2. Cambio de la corriente de campo (I_f). Una disminución en R_F causa que I_F aumente, lo que incrementa la fuerza magnetomotriz total del generador. Como $\mathcal{F}_{tot}$ aumenta, el flujo ϕ de la máquina aumenta y E_a se eleva. Finalmente un aumento en E_a eleva V_T .

4.8.9 Características experimentales del comportamiento del generador compuesto en conexión diferencial larga.

Para el generador compuesto en conexión diferencial larga los parámetros que interesan conocer son: carga conectada al generador en ohms (Ω), corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de carga que suministra el generador (I_L), voltaje en las terminales del generador (V_t). Todos estos valores son manteniendo la velocidad del generador constante de 1800 RPM. La tabla 4-6 muestra los resultados obtenidos en la conexión.

Carga (Ω)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
∞	0.16	0.14	0	1800	64.6
1200	0.19	0.12	0.04	1800	57.7
600	0.20	0.11	0.08	1800	50.3
300	0.20	0.07	0.11	1800	36.0
150	0.20	0.03	0.14	1800	21.68
120	0.19	0.02	0.14	1800	17.85
100	0.19	0.02	0.14	1800	15.12

Tabla 4-6 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial larga

Como se observa en la tabla 4-6 en condiciones de vacío la conexión compuesta diferencial larga se comporta de manera normal, no presenta corriente de línea pero tiene un voltaje pequeño en terminales de 64.6 V. La carga que se le conecta al generador no demanda demasiada corriente, pero aun así el voltaje en terminales cae rápidamente. Esto es debido a que la poca corriente de línea provoca que los flujos producidos por el devanado serie y shunt se resten, por lo tanto el voltaje se disminuye notablemente. Debido a que estos flujos se restan uno del otro no es posible alcanzar las condiciones nominales del generador, ésta característica del generador en conexión diferencial larga tiene muchas desventajas y en consecuencia no tiene muchas aplicaciones en la vida real. La característica de corriente de línea contra el voltaje en terminales de éste generador se muestra en la figura 4-17, de acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 4-6.

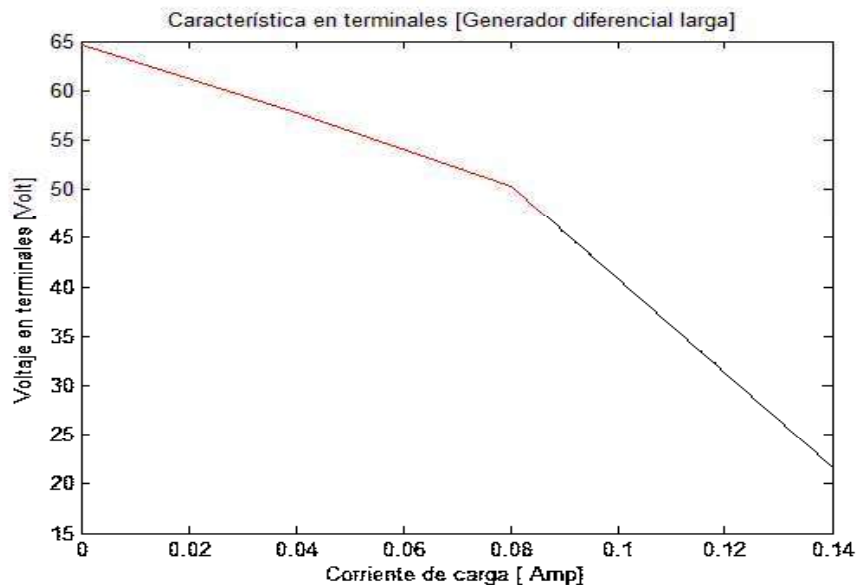


Fig. 4-17 Característica voltaje-corriente, conexión diferencial larga.

Como podemos ver en la figura 4-17 la caída de tensión que se presenta en el generador es muy rápida en el pequeño rango de corriente de carga debido a su inestabilidad y por lo tanto esta conexión es muy inestable y no tiene gran uso en la actualidad.

4.8.10 Características experimentales del comportamiento del generador compuesto en conexión diferencial corta.

Para el generador compuesto en conexión diferencial corta los parámetros que nos interesa conocer son los mismos que en la conexión diferencial larga: carga conectada al generador en ohms (Ω), corriente de armadura (I_a), corriente de campo (I_f), corriente de carga que suministra el generador (I_L), voltaje en las terminales del generador (V_t). Todos estos valores son manteniendo la velocidad del generador constante de 1800 RPM. La tabla 4-7 muestra los resultados obtenidos en la conexión.

Carga (Ω)	I_a (Amp)	I_f (Amp)	I_L (Amp)	ω (RPM)	V_t (V)
∞	0.25	0.24	0	1800	105
1200	0.24	0.22	0.01	1800	96.3
600	0.21	0.20	0.02	1800	85.7
300	0.14	0.14	0.03	1800	59.2
150	0.07	0.06	0.04	1800	28.4
120	0.05	0.04	0.05	1800	22.06
100	0.04	0.03	0.06	1800	18.11

Tabla 4-7 Resultados obtenidos en la conexión compuesta diferencial corta.

De manera similar como se observa en la tabla 4-7 en condiciones de vacío la conexión compuesta diferencial corta se comporta de manera normal, no presenta corriente de línea pero presenta un voltaje en terminales de 105 V. La carga que se le conecta al generador no demanda demasiada corriente al igual que en la conexión diferencial larga, pero aun así el voltaje en terminales cae rápidamente. Esto también se debe a que la poca corriente de línea provoca que los flujos producidos por el devanado serie y shunt se resten. Debido a que estos flujos se restan uno del otro no se alcanzan las condiciones nominales del generador, ésta característica del generador tiene muchas desventajas y en consecuencia no tiene muchas aplicaciones en la vida cotidiana debido a su inestabilidad. La

característica de corriente de línea contra el voltaje en terminales de éste generador se muestra en la figura 4-18, de acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 4.7.

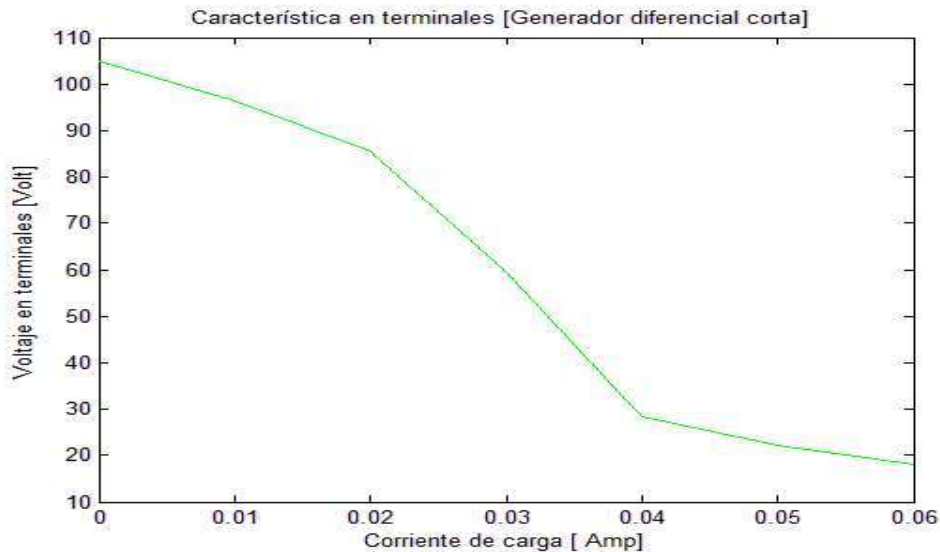


Fig. 4-18 Característica voltaje-corriente conexión diferencial corta.

Como se observa en la figura 4-18 la caída de tensión que se presenta en el generador es muy rápida y drástica, la corriente de carga es muy pequeña y produce una caída grande de voltaje. Esta conexión es inestable y no tiene gran uso en la actualidad.

4.8.11 Resumen sobre las diferentes conexiones del generador de cd.

En la figura 4-19 se muestran todas las curvas características de corriente de línea contra el voltaje en terminales del generador, para cada una de las diferentes conexiones: independiente, shunt, serie, compuesta acumulativa larga y corta, compuesta diferencial larga y corta, la curva de la conexión en excitación independiente tiene un voltaje en condiciones de vacío de 136.8 V, el cual empieza a disminuir conforme la corriente de carga empieza a aumentar, pero también se observa que ésta caída no es muy rápida ya que esta conexión presenta una regulación de velocidad del 13%, lo cual indica que es una muy buena regulación.

Ahora para la curva de la conexión shunt, se aprecia que tiene una pendiente más inclinada esto quiere decir que tiene una mayor disminución del voltaje conforme va

aumentando la corriente de carga, ésta curva empieza con un voltaje en vacío de 129.5 V y cae más rápidamente que la curva para la conexión excitación independiente ya que al aumentar la corriente de carga, también cambia la corriente de excitación en el devanado shunt, mientras que en la conexión independiente la corriente de excitación en el devanado shunt permanece constante para cualquier corriente de carga. Como podemos ver en la curva de la conexión shunt nos da una clara idea de que presenta una mala regulación de voltaje. Para la curva de la conexión serie se presenta un incremento del voltaje en terminales del generador conforme se va incrementando la corriente de carga, esto quiere decir que el generador serie siempre presentará una regulación de voltaje negativa. La curva empieza con 7.25 V en vacío y va aumentando junto con la corriente de carga hasta un voltaje de 12.12 V, lo cual indica que el voltaje a plena carga siempre será mayor que el voltaje del generador en condiciones de vacío.

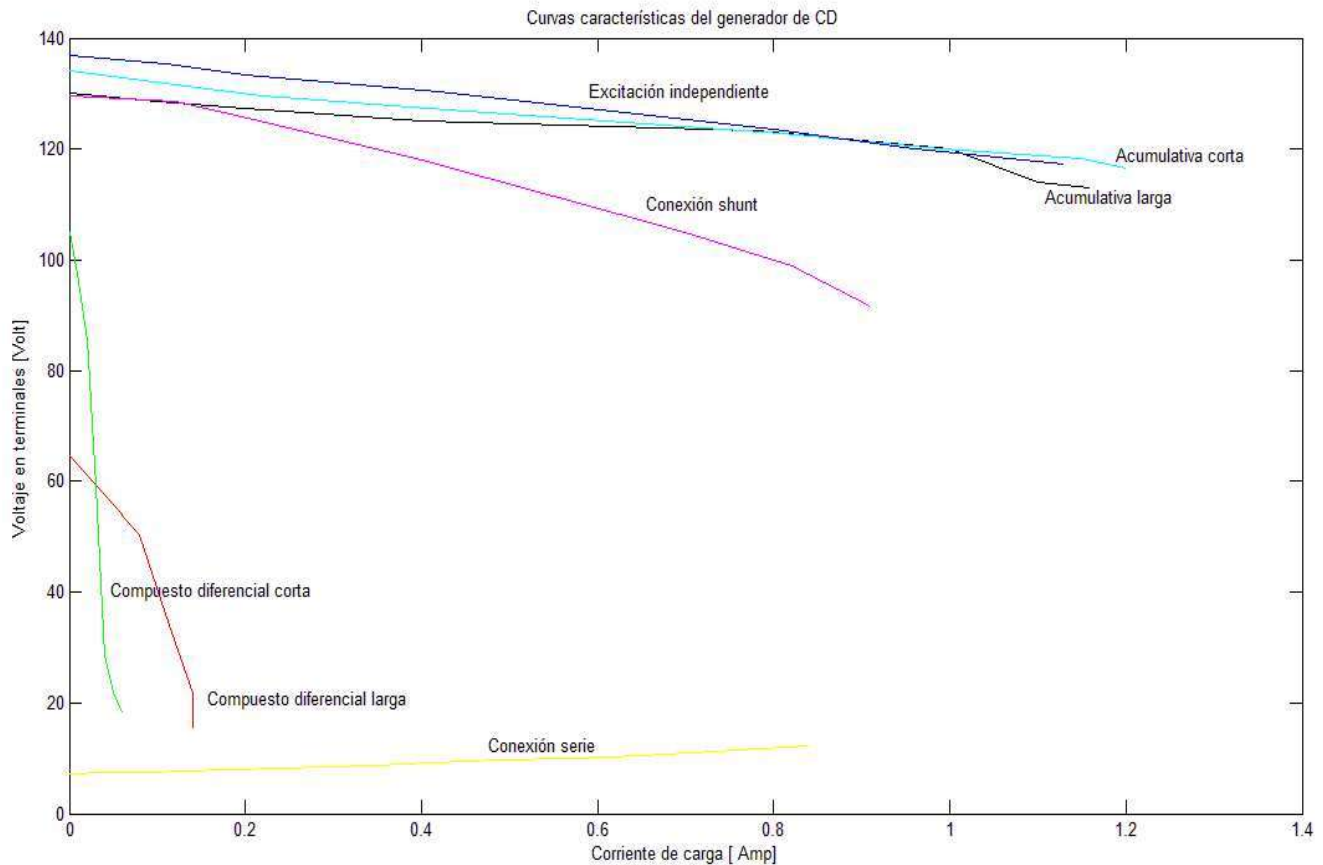


Fig. 4-19 Características voltaje-corriente para las conexiones del generador cd.

Para la conexión compuesta acumulativa, se observa que tanto la conexión larga y corta sus curvas características son semejantes, a diferencia que la conexión acumulativa larga presenta un voltaje de 130 V en condiciones de vacío mientras que la conexión acumulativa corta tiene 134 V. Estas dos conexiones se comportan de manera similar, no presentan grandes diferencias una de la otra bajo condiciones en vacío hasta las condiciones nominales de operación del generador. Al principio estas dos conexiones se comportan como un generador shunt, pero mientras va aumentando la corriente de carga no se presenta la caída de voltaje drástica como en la conexión shunt, esto es debido a que conforme aumenta la corriente de carga el generador empieza a tener su campo serie más fuerte lo cual ayuda a que el voltaje no caiga rápidamente. Estas dos conexiones también tienen buena regulación de voltaje, al igual que la conexión excitación independiente.

Por último en la conexión compuesta diferencial se puede ver que la conexión diferencial larga y corta son muy poco convenientes, ya que presentan una disminución exageradamente rápida de tensión, ya que los flujos del devanado shunt y serie se restan y provocan que la tensión disminuya de esta manera drástica. La conexión compuesta diferencial larga tiene un voltaje en vacío de 64.6 V mientras que en la conexión diferencial corta es de 105 V, la dos conexiones tiene muy mala regulación de voltaje y no tienen aplicación en la industria. Por lo tanto estas conexiones son inadecuadas para cualquier aplicación debido a su inestabilidad.

CAPÍTULO 5

Conclusiones sobre la máquina de cd.

5.1 Conclusiones generales.

La máquina de cd en la actualidad juega un papel de importancia creciente en la industria moderna. Su fácil control de posición, par y velocidad la definen como una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Aunque presenta un inconveniente muy considerable, este es el desgaste de sus escobillas y provoca que continuamente se le proporcione mantenimiento a la máquina, lo cual implica un caro y laborioso mantenimiento. Con la llegada de la electrónica de potencia su uso ha disminuido en gran medida, pues los motores de corriente alterna, pueden ser controlados de igual forma a precios más accesibles. A pesar de esto, los motores de cd se siguen utilizando en muchas aplicaciones de potencia (trenes y tranvías) o de precisión (máquinas, micro motores, etc.). El motor de cd se utiliza en casos en los que es importante el poder regular continuamente su velocidad, además, se utiliza en aquellos casos en los que es necesariamente utilizar corriente directa, como es el caso de motores accionados por pilas o baterías. La conexión serie y compuesta en el motor de cd, son ideales para las aplicaciones de potencia, ya que proporcionan un par muy grande para el arranque de cargas pesadas a velocidades pequeñas. En tanto la conexión en excitación independiente y shunt cumplen las características para las necesidades de velocidad constante, ya que no presentan una disminución grande de velocidad al pasar de condiciones de vacío a condiciones nominales de plena carga en la operación de motor. Se mostraron tablas y graficas de la operación de la máquina de cd para cada una de sus conexiones, y brindar una mejor visión de su comportamiento y por lo tanto facilitar más su entendimiento.

5.2 Conclusiones particulares.

- La máquina de cd se encuentra en un auge muy importante para la industria actual.
- La máquina de cd operando como motor en conexión shunt presenta una buena regulación de velocidad, tales resultados obtenidos para esta prueba en dicha conexión fueron lo esperado.
- Es importante colocar las escobillas en el punto neutro para tener una buena conmutación, antes de empezar a trabajar con la máquina y de esta manera no se produzca un chisporroteo excesivo en la máquina.
- Se presentó un calentamiento en la máquina de cd debido a que se trabajó sobre pasando sus condiciones nominales de operación, para obtener una mejor informacion de datos.
- El tipo de construcción de los devanados de la máquina de cd se basa en dos devanados: imbricado y ondulado. En la máquina que se trabajó presenta un devanado tipo imbrincado.
- El devanado de lazo o imbricado es el devanado más común en las máquinas de cd modernas.
- La potencia y par desarrollados por un motor de cd son 2 de sus propiedades más importantes, las cuales fueron mostradas para cada tipo de conexión.
- El motor serie es en esencia un motor de velocidad variable.
- Las escobillas de la máquina de cd con la que se trabajó se desgastaron fácilmente debido a la fricción que existe entre ellas y el conmutador.
- Este desgaste de escobillas provoca mala conmutación y por lo tanto se presenta un chisporroteo en la máquina, por lo tanto es necesario cambiar dichas escobillas.
- Toda maquinaria que se utilice para poner en marcha cargas muy pesadas tales como grúas, montacargas, trenes eléctricos y elevadores cuenta con un motor conectado en serie para proporcionar el alto par de arranque que se requiere para mover dichas cargas.

- Se observa que las corrientes de arranque para el motor de cd en cualquiera de sus conexiones son excesivas, y por lo tanto el motor debe tener una protección ideal para el momento de arranque.
- El motor en conexión shunt se utiliza en la automotriz, en autos con asientos eléctricos reclinables, en los vidrios eléctricos de las puertas, en los limpiaparabrisas etc etc.
- Gran parte de la energía eléctrica utilizada para la iluminación de algunos buques es suministrada por un generador de cd en conexión compuesta acumulativa.
- El voltaje en terminales del generador shunt disminuyó más abruptamente al incrementarse la carga que el del generador con excitación independiente, pero no cae tan rápido como en la conexión serie.
- El flujo remanente del generador provocó un voltaje en terminales de aproximadamente 7 Volts.
- Cuando el generador se trabajó sin carga para cualquier tipo de conexión, el voltaje entre terminales es igual al voltaje inducido.
- El control de voltaje del generador shunt simplemente se hizo variando la corriente de excitación mediante el reóstato de campo.
- Los generadores compuestos acumulativos ayudan a evitar que el voltaje en terminales disminuya conforme se incrementa la carga.
- El generador compuesto diferencial no es utilizado en la actualidad, debido a que es muy inestable. Y como podemos ver en los datos obtenidos para este tipo de conexión, se observa que no se pudieron alcanzar las condiciones nominales de operación para el generador debido a su inestabilidad.
- En el generador serie se presentó un aumento de voltaje en terminales conforme se incrementa la carga conectada al generador.

Referencias

[Cathey, 2002]

Cathey Jimmie J. Máquinas Eléctricas “Análisis y diseño aplicando Matlab”, México, Mc Graw Hill, 2002.

[Chapman, 2005]

Chapman Stephen J. Máquinas Eléctricas, México. Mc Graw Hill, 2005.

[Fitzgerald et al, 2003]

Fitzgerald A. E, Charles Kingsley Jr, Umans Stephen D, Máquinas Eléctricas, México, Mc Graw Hill, 2003.

[Gourishankar, 1990]

Gourishankar V. Conversión de energía electromecánica, México, Alfaomega, 1990.

[Richardson y Caisse, 2008]

Richardson Donald V. y Caisse Arthur J. Jr, Máquinas Eléctricas Rotativas y Transformadores, México, Prentice Hall, 2008.

[Wildi, 2007]

Wildi, Theodore. Máquinas eléctricas y sistemas de potencia, México. Prentice Hall de Pearson, 2007.