

GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA.

- La maquina de CD.
- Aplicaciones.
- Construcción general.
- Construcción y tamaño.
- Piezas embutidas del núcleo de armadura.
- Piezas embutidas de polo principal y de conmutación.
- Yugo de carcasa.
- Conmutador.
- Escobilla de carbón o carbones.
- Principios Generales.
- Inducción electromagnética.
- Fuerza sobre conductores por los que fluye corriente en un campo magnético.
- Reacciones de generador y motor.
- Características de la corriente directa.
- Excitación de campo.
- Devanados de armadura.
- Términos.
- Devanados múltiples o imbricados.
- Devanados de dos circuitos u ondulados.
- Reacciones de armadura.
- Efecto de magnetización Cruzada.
- Distorsión de campo.
- Reducción de flujo a causa de la magnetización cruzada.
- Efecto de desmagnetización del desplazamiento de carbones.
- Curvas de saturación sin carga y a plena carga.
- Conmutación.
- Conmutación.
- Inversión de corriente de conductor.
- Carbones de conmutador.
- Voltaje de reactancia de conmutación.
- Polos de conmutación.
- Voltaje de reactancia de formula de conmutación.
- La zona de conmutación.
- Excitación de polo de conmutación.
- Cálculo de espacios de aire de polo de conmutación.
- Dimensiones de polos de conmutación.
- Devanados de compensación.
- Volts por barra.
- Curvas de potencial de carbón.
- Diseño de armadura.
- Ecuación FEM.
- Velocidades del rotor.
- Diámetros del rotor.
- Numero de polos.
- La densidad B_g de flujo de entrehierro del polo principal.
- Numero de conductores por pulgada de circunferencia (q) del rotor.
- Diámetro del conmutador.
- Carbones Y porta carbones.

- Selección de un diseño aproximado.
- Ranuras y bobinas de armadura.
- Diseño aproximado de ranura.
- Campos de compensación y conmutación.
- Datos de Compensación del devanado.
- Cálculos del devanado de compensación.
- Cálculos del devanado de conmutación.
- Cálculos de conmutación.
- Cálculos magnéticos.
- Trayectorias de Flujo.
- Coeficiente de carter y ampere-vueltas de entrehierro.
- Los ampere-vueltas de dientes de rotor.
- Calculo de datos de saturación sin carga.
- Curva de saturación a plena carga para maquinaria compensada.
- Curva de saturación a plena carga para maquinaria no compensada.
- Calculo de volts máximos por barra.
- Campos principales.
- Campos Principales y calentamiento de campo principal.
- Cálculos de campo principal.
- Enfriamiento y ventilación.
- Causa de calentamiento.
- Elevaciones permisibles de temperatura medida.
- Gradientes de temperatura en bobinas de rotor.
- Calentamiento de conexiones finales de devanados de armadura.
- Calentamiento de conmutador.
- Aplicación de constantes de calentamiento.
- Perdidas y eficiencia.
- Perdida I^2R de cobre de armadura.
- Perdida I^2R de campo de compensación, de conmutación y serie.
- Perdida I^2R de carbones.
- Perdida de carga.
- Perdida de campo en derivación.
- Perdida de núcleo.
- Perdida por fricción de carbones.
- Fricción y resistencia al viento.
- Características de generador.
- La regulación del voltaje de un generador de cd.
- El generador compensado y separadamente excitado.
- El generador de cd no compensado y separadamente excitado.
- El generador de cd no compensado y autoexcitado.
- Inestabilidad de generadores autoexcitados.
- Generadores de cd de excitación mixta (compound).
- Generadores en serie.
- Constantes de tiempo de campo.
- Constante de tiempo de circuito de armadura.
- Prueba.
- Pruebas en fabrica.
- Operación y mantenimiento de generadores.
- Generalidades.
- Antes de la instalación.
- Alineamiento.
- Comprobaciones previas a la operación.

- Comprobaciones de operación.
- Generadores en paralelo devanados en derivación.
- Generadores de devanado compuesto en paralelo.
- Mantenimiento.
- Conmutación deficiente.
- Generadores Especiales.
- Generalidades.
- Convertidores sincrónicos.
- Reguladores giratorios.
- Aparatos de tres hilos.
- Generadores de cd homopolares o aciclicos.
- Bibliografía.
- **LA MAQUINA DE CD.**
- **Aplicaciones.**

El papel mas 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; esta es en realidad una corriente eléctrica de cd que permite la mejor conmutación posible en el motor, porque carece de las formas de ondas bruscas de energía de cd de los rectificadores. El generador tiene una respuesta excelente y es particularmente apropiado para el control preciso de salida por reguladores de retroalimentación de control, además de estar bien adaptado para producir corriente de excitación de respuesta y controlada en forma precisa tanto para maquinas de ca como de cd.

El motor de cd juega un papel de importancia creciente en la industria moderna porque puede operar a cualquier velocidad desde cero hasta su máxima de régimen y mantenerla hay de forma muy precisa. Por ejemplo, Los trenes de laminación de acero que son de alta velocidad y de varias etapas, no serian posibles sin los motores de cd. Cada etapa debe mantenerse precisamente a una velocidad exacta, que es mayor que la etapa precedente, para adaptarse a la reducción del grosor del acero en esa etapa y mantener el voltaje correcto en el acero entre etapas.

• **Construcción general.**

La figura 1 en el anexo muestra las partes de un motor de cd de tamaño grande o mediano; todos los tamaños difieren de las maquinas de ca en que tienen un conmutador y la armadura del rotor. También tienen los polos salientes en el estator y, excepto en algunos modelos pequeños, tienen polos de conmutación entre los polos principales.

• **Construcción y tamaño.**

Las máquinas de cd pequeñas tienen razones grandes de superficie a volumen y trayectorias cortas para que el calor llegue a las superficies de disipación. El enfriamiento requiere un poco más que medios para soplar aire en el rotor y entre los polos. Las piezas embutidas en el rotor están montadas firmemente en el eje, sin conductos de aire en ellas.

Las unidades más grandes, con núcleos más largos y profundos, usan la misma construcción pero con agujeros longitudinales en las piezas embutidas del núcleo para el aire de enfriamiento.



Las máquinas medianas y grandes deben tener grandes superficies de disipación de calor y contar con aire de enfriamiento bien dirigido, ya que de lo contrario se formarán lugares calientes. Sus piezas embutidas de núcleo están montadas en brazos, para permitir que grandes volúmenes de aire de enfriamiento lleguen a los

muchos ductos de ventilación del núcleo, así como a los espacios de ventilación entre las extensiones del extremo de la bobina.

- **Piezas embutidas del núcleo de armadura.** Por lo general, estas piezas son de acero laminado eléctrico de alta permeabilidad, de 0.017 a 0.025 in de grueso, y tienen entre ellas una película aislante. Las unidades pequeñas y medianas utilizan piezas embutidas segmentales como las que se ilustran en la figura 2, que también muestra los dedos que se usan para formar los ductos de ventilación.



- **Piezas embutidas de polo principal y de conmutación.** Estas piezas suelen ser más gruesas que las del rotor porque sólo las caras polares están sujetas a cambios de flujo de alta frecuencia; las piezas son de 0.062 a 0.125 in de grueso y por lo general van remachadas.
- **Yugo de carcasa.** Es común que esta pieza esté fabricada de placa de acero blando laminado pero, en grandes generadores de alta demanda en donde se presentan cambios rápidos de carga, se pueden usar laminaciones. La carcasa sólida tiene una constante magnética de tiempo de 1/2 s o más, dependiendo de su grosor; la de la carcasa laminada va de 0.05 a 0.005 s.
- **Conmutador.** Esta pieza es realmente el corazón de la máquina de cd y debe operar con variaciones de temperatura de al menos 55°C, con velocidades periféricas que pueden llegar a 7000 ft/min. Sin embargo, debe permanecer uniforme a no más de 0.002 o 0.003 in y alineada entre barra y barra a no más de 0.0001 in.

El conmutador está hecho de barras duras de cobre laminadas con precisión en forma de cuña. Dichas barras están separadas una de otra por segmentos de laminillas de mica, cuyo grosor debe conservarse de modo muy preciso para obtener un espaciado casi perfecto de las barras y que no haya oblicuidad. Este grosor es de 0.020 a 0.050 in, dependiendo del tamaño del generador y del voltaje máximo que se pueda esperar entre las barras durante la operación. Los segmentos de mica y las barras están fijos entre dos anillos metálicos en V y aislados de éstos por conos de mica. En conmutadores de velocidad muy alta, de alrededor de 10000 ft/min, se usan anillos de acero de contracción para sostener las barras y se usa mica bajo los anillos.

- **Escobilla de carbón (o simplemente carbones).** Estas piezas se deslizan sobre las barras del conmutador y llevan la corriente de carga de las bobinas del rotor al circuito externo. Los portacarbonos sujetan los carbones contra la superficie del conmutador mediante resortes, para mantener una presión razonablemente constante y que se deslicen de modo uniforme.

2. PRINCIPIOS GENERALES

- **Inducción Electromagnética.** Un campo magnético está representado por líneas de flujo continuas que se considera emergen de un polo norte y entran en un polo sur. Cuando cambia el número de dichas líneas eslabonadas por una bobina (Fig. 3), se induce un voltaje en la bobina igual a 1 V por un cambio de 108 eslabonamientos/s (Mx/s) por cada vuelta de la bobina, es decir, $E = (d\Phi / dt) \times 10^{-8}$ V.



Si las líneas de flujo se deforman por el movimiento del conductor de la bobina antes de romperse, la dirección del voltaje inducido se considera hacia dentro del conductor si se muestra que las flechas, por el flujo distorsionado, apuntan en el sentido del giro de las manecillas del reloj, y hacia afuera si apuntan en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj. Esta es la acción de generador (Fig. 4).



- **Fuerza sobre conductores por los que fluye corriente en un campo magnético.** Si un conductor lleva

una corriente, alrededor del mismo se forman espiras de flujo (Fig. 5). La dirección del flujo es en el sentido de giro de las manecillas del reloj si la corriente es tal que se aleja del observador y hacia el conductor, y es en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj si la corriente del conductor sale del papel y se dirige al observador.



Si este conductor está en un campo magnético, la combinación del flujo del campo y el flujo que genera el conductor puede considerarse que produce una concentración de flujo en el lado del conductor en donde los dos flujos son aditivos, y una disminución en el lado en donde se oponen. El resultado es una fuerza sobre el conductor, que tiende a moverlo hacia el lado que tiene flujo reducido (Fig. 6). Ésta es la acción de motor.



2.3. Reacciones de generador y motor. Es evidente que un generador de cd tendrá inducido su voltaje útil por las reacciones antes descritas, y debe contarse con un medio excitador externo para hacer girar la armadura de modo que las espiras conductoras se muevan por las líneas de flujo desde los polos estacionarios. Sin embargo, estos conductores deben llevar corriente para que el generador sea útil y esto ocasionará fuerzas de retardo en ellos, como se describe en el párrafo 2.2; la unidad motriz primaria debe vencer estas fuerzas.

En el caso del motor de cd, las espiras conductoras se moverán en el flujo y los voltajes se inducirán en ellas como se describe en el párrafo 2.1; estos voltajes inducidos se denominan fuerza contraelectromotriz porque se oponen al flujo de corrientes que producen las fuerzas que hacen girar la armadura. Por lo tanto, esta fuerza electromotriz debe ser vencida por un exceso de voltaje que se aplica a las bobinas por la fuente externa de voltaje.

2.4. Características de la corriente directa. Las máquinas de corriente directa requieren muchos conductores y dos o más polos estacionarios que producen flujo, para proporcionar el voltaje generado necesario o el par motor necesario. La dirección del flujo de corriente en los conductores de la armadura bajo cada polo particular debe ser siempre correcta para obtener los resultados deseados (Fig. 7). Por lo tanto, la corriente en los conductores debe invertirse en algún momento cuando los conductores pasan por el espacio entre polos contiguos norte y sur.



Esto se logra mediante los carbones conectados al circuito externo; dichos carbones hacen contacto con los conductores por medio del conmutador.

Para describir la conmutación, en la figura 8 se muestra el devanado de armadura de anillo Gramme (que no se usa en máquinas prácticas). Todos los conductores están conectados en serie y enrollados alrededor de un anillo de acero, mismo que proporciona una trayectoria para el flujo del polo norte al polo sur. Nótese que sólo las porciones exteriores de los conductores cortan el flujo cuando gira el anillo. Los voltajes se inducen como se ilustra. Si no hay circuito externo, no fluyen corrientes porque los voltajes inducidos en las dos mitades están en oposición. Sin embargo, si las bobinas se conectan a un conmutador C formado de bloques de cobre aislados entre sí, los carbones B- y B+ se pueden usar para conectar las dos mitades en paralelo con respecto a un circuito externo y circularán corrientes en la dirección apropiada en los conductores bajo los polos.



Conforme la armadura gira, la bobina M pasa de un lado de la línea neutra al otro y el sentido de la corriente en ella se muestra en tres instantes sucesivos en A, B y C de la figura 9. Cuando la armadura se mueve de A a

C, el carbón cambia el contacto del segmento 2 al segmento 1, y la corriente en M se invierte automáticamente. Durante un período breve, el carbón hace contacto con ambos segmentos y pone en cortocircuito la bobina. Es importante que no se induzca voltaje en M durante ese momento, ya que las corrientes resultantes que circulan podrían ser perjudiciales. Esto explica la localización de los carbones de tal modo que M estará en el punto neutro de flujo entre los polos.



- **Excitación de Campo.** Puesto que los conductores por los que fluye corriente producen flujo que los enlaza como se describe en el párrafo 2.2, el flujo de los polos principales se obtiene al devanar conductores alrededor de los cuerpos polares y por la corriente que pasa por ellos; esta corriente puede obtenerse de distintas formas. Cuando un generador produce su propia corriente de excitación, es autoexcitado y, cuando la corriente se obtiene desde una fuente externa, es de excitación por separado; cuando se excita por la corriente de carga de la máquina, es excitado en serie.

3. DEVANADOS DE ARMADURA

3.1 Términos. El devanado de anillo Gramme no se usa, porque la mitad de los conductores (los que están dentro del anillo) no cortan flujo y se desperdician. En las figuras 8, 10 y 11 se muestran dichos devanados sólo porque ilustran muy bien los tipos de conexiones.



Un devanado cerrado individual se cierra en sí mismo sólo después de incluir todos los conductores, como se muestra en las figuras 8 y 10.

Un devanado cerrado doblemente se cierra en sí mismo después de incluir la mitad de los conductores, como en la figura 11.

Como se indica, un devanado simple sólo tiene dos trayectorias por la armadura desde cada carbón (Fig. 8). Un devanado dúplex (o doble) tiene el doble de trayectorias desde cada carbón, como se ve en las figuras 10 y 11. Nótese que cada carbón debe cubrir al menos dos segmentos de conmutador con un devanado doble, o un circuito se desconectará a veces del circuito externo. Si bien es posible usar devanados cerrados múltiples y múltiplex, son poco comunes en Estados Unidos, pero se usan en Europa, en algunas máquinas grandes.

Las máquinas modernas de cd tienen las bobinas de armadura en ranuras radiales en el rotor. Las cuñas no metálicas contienen por lo general las bobinas, pero algunos rotores sin cuñas utilizan bandas de material no metálico alrededor del núcleo, como son fibras de vidrio y resina de poliéster, lo que permite ranuras de menor profundidad y ayuda a reducir las descargas disruptivas del conmutador. No obstante, los conductores de la parte superior están cerca de las caras polares y pueden tener pérdidas parásitas muy grandes. Los extremos de bobina que están fuera de las ranuras se mantienen abajo en los soportes mediante bandas de poliéster vidriado para ambos tipos.

3.2 Devanados múltiples o imbricados. La figura 12 muestra una bobina de devanado imbricado, en la que los conductores que se ven del lado izquierdo están en el lado superior de la ranura de rotor; los del lado derecho están en la mitad inferior de otra ranura aproximadamente a un paso polar de distancia. En cualquier instante, los lados están bajo polos adyacentes y los voltajes que se inducen en los dos lados son aditivos. Otros lados de la bobina llenan las porciones restantes de las ranuras. Los hilos de la bobina están conectados a los segmentos del conmutador, y éste conecta también las bobinas para formar



El devanado de armadura. Esto se muestra en la figura 13. Las caras polares son ligeramente más cortas que el núcleo del rotor.



Casi todas las máquinas de cd medianas y grandes utilizan devanados imbricados símplex, en los que el número de trayectorias en paralelo en el devanado de la armadura es igual al número de polos principales. Esto permite que la corriente por trayectoria sea lo suficientemente baja para admitir conductores de medidas razonables en las bobinas.

Devanados. Las representaciones de devanados de cd son necesariamente complicados. La figura 14 muestra el devanado imbricado correspondiente al devanado de anillo de Gramme de la figura 8. Desafortunadamente, las porciones finales no productivas están resaltadas en esos diagramas, y las porciones largas y útiles de las bobinas de las ranuras del núcleo se muestran como líneas radiales. Los conductores de las capas superiores se muestran como líneas llenas, y los de las capas inferiores como líneas punteadas. Las conexiones de extremo interior son las conectadas a las barras del conmutador. Por conveniencia, los carbones se muestran dentro del conmutador.



Nótese que ambos devanados tienen el mismo número de conductores útiles, pero que el devanado de anillo de Gramme requiere el doble del número de conductores reales y el doble del número de barras de conmutador.

En la figura 15 se muestra un devanado imbricado símplex de 6 polos. El estudio de éste revela las seis trayectorias paralelas entre las terminales positiva y negativa. Los tres carbones positivos están conectados fuera de la máquina por un anillo T+ de cobre y los carbones negativos por T-.



Los dos lados de una bobina imbricada pueden ser de paso entero (exactamente a un paso polar de distancia), pero la mayor parte de las máquinas utilizan un paso corto (menos de un paso polar de distancia), con el tiro o vía de bobina a medio paso de ranura menos que un paso polar. Esto se hace para mejorar la conmutación.

Igualadores de potencia. Como se muestra en la figura 15, las trayectorias paralelas del circuito de armadura están bajo polos diferentes, y cualesquiera diferencias en el flujo de los polos ocasiona diferentes voltajes que se generan en las diversas trayectorias. Las diferencias de flujo pueden ser ocasionadas por espacios desiguales entre electrodos, por un número diferente de vueltas en las bobinas de campo de polo principal o por reluctancias diferentes en los circuitos de hierro.

Con voltajes diferentes en las trayectorias puestas en paralelo por los carbones, las corrientes circularán para igualar los voltajes. Estas corrientes deben pasar por los carbones y pueden ocasionar chispas, pérdidas adicionales y calentamiento. La variación en el flujo polar se reduce al mínimo por una cuidadosa fabricación pero no puede evitarse por completo.

Para reducir dichas corrientes a un mínimo, las conexiones de cobre se usan para poner en cortocircuito los puntos de las trayectorias puestas en paralelo que se supone están al mismo voltaje. Dichos puntos estarían a exactamente dos pasos polares de separación en un devanado imbricado. Por lo tanto, en un devanado de 6 polos de este último tipo cada punto del circuito de armadura tendrá otros dos puntos que deben estar a su potencial exacto. Para que estos puntos sean accesibles, el número de barras del conmutador y el número de ranuras deben ser un múltiplo del número de polos dividido entre 2.

Estos anillos cortocircuitados se llaman igualadores. Las corrientes alternas fluyen por ellos en lugar de por los carbones. La dirección de circulación es tal que los polos débiles se magnetizan y los intensos se debilitan. Por lo general se iguala una bobina en alrededor de 30% de las ranuras. El área de sección transversal de un igualador es de 20 a 40% de la del conductor de armadura.

Los cuellos involutos o conexiones, a cada barra de conmutador desde conductores a dos pasos polares de separación dan igualación de 100% pero son problemáticos debido a la inercia y a problemas de conducción superficial del aislamiento.

En la figura 15 se muestra las conexiones igualadoras tras las conexiones del conmutador. Por lo general, están localizadas en las extensiones posteriores de la bobina, y así quedan más accesibles y menos sujetas a problemas de polvo de los carbones.

3.3 Devanados de dos circuitos u ondulados. La figura 16 muestra un tipo de onda de bobina. En la figura 17 se ilustra un devanado ondulado de 6 polos. Un estudio revela que tiene sólo dos trayectorias paralelas entre las terminales positiva y negativa, por lo que sólo se requieren dos juegos de carbones. Cada carbón pone en cortocircuito $p/2$ bobinas en serie; puesto que los puntos a, b y c están al mismo potencial (y también los puntos d, e y f), los carbones pueden localizarse en cada uno de estos puntos para permitir un conmutador de sólo un tercio de largo.



El devanado debe avanzar o retroceder una barra de conmutador cada vez que pase alrededor de la armadura para que sea cerrado sencillo. Por lo tanto, el número de barras debe ser igual a $(kp/2) \pm 1$, en donde k es un número entero y p es el número de polos. El devanado no necesita igualadores porque todos los conductores pasan bajo todos los polos.

Aun cuando la mayor parte de los devanados ondulados son de dos circuitos, pueden ser de circuitos múltiples, por ejemplo 4 o 16 circuitos en una máquina de 4 polos, o 6, 12 o 24 circuitos en una máquina de 12 polos. Se pueden hacer devanados ondulados de circuitos múltiples con el mismo número de circuitos que polos, mediante las mismas combinaciones de ranuras y barras que en un devanado imbricado. Por ejemplo, con una máquina de 8 polos, de 100 ranuras y 200 barras de conmutador, el número de barras para un devanado imbricado simplex sería de la barra 1 a la barra 2 y luego de la barra 2 a la barra 3, etcétera. Para un devanado ondulado de 8 circuitos, el devanado no debe cerrar circuitos/2 barras, o sea 4. Por tanto el número sería de la barra 1 a la 50, a la barra 99, a la barra 148, etcétera. El número es $(\text{barras} \pm \text{circuitos}/2) (p/2)$, en este caso, $(200 - 4) / 4 = 49$. Teóricamente dichos devanados no requieren igualadores, pero se obtienen mejores resultados si se los usa.

Tanto los devanados ondulados imbricados como los múltiples pueden devanarse en la misma ranura y combinación de barra simultáneamente, esto se logra al hacer cada devanado con conductores de la mitad del calibre. Esta combinación se semeja a una *pata de rana* y se le conoce con ese nombre. No necesita igualadores, pero requiere más espacio de aislamiento en las ranuras y raras veces se usa.

Algunos devanados ondulados requieren *bobinas muertas* (sin corriente). Por ejemplo, una máquina grande de 10 polos puede tener un círculo de piezas embutidas de rotor hechas de 5 segmentos para evitar variación en reluctancia cuando el rotor pase bajo los 5 pares de polos. Para evitar arreglos diferentes de ranura en los segmentos, el número total de ranuras debe ser divisible entre el número de segmentos, o sea 5 en este caso. Esto requiere que el número de barras de conmutador también sea un múltiplo k de 5. Sin embargo, el número de barra para un devanado ondulado simplex debe ser entero e igual a $(\text{barras} \pm 1) (P/2)$. Obviamente $(5k \pm 1) / 5$ no puede satisfacer este requisito. En consecuencia una bobina, llamada *bobina muerta*, no se conectará en el devanado y sus puntas se encintarán para aislarla por completo. No habrá barra para ella, y por tanto el

número de barra será un entero. Las bobinas muertas deben evitarse porque perjudican la conmutación.

4. REACCIONES DE ARMADURA

4.1. Efecto de magnetización cruzada. En la figura 18a se representa el campo magnético producido en el entrehierro de una máquina de dos polos por la fuerza magnetomotriz (fmm) de las bobinas principales de excitación, y la parte *b* representa el campo magnético producto por la fmm del devanado de armadura sólo cuando lleva una corriente de carga. Si cada uno de los conductores de armadura *Z* lleva $I_c A$, entonces la fmm entre *a* y *b* es igual a

ZI p A_v , en donde $\frac{a}{b} =$ razón de arco de polo a paso de polo. En el supuesto de que toda la reluctancia sea en el entrehierro, la mitad de la fmm actúa en *ce* y la mitad en *fd*, y el efecto de magnetización cruzada en cada punta de polo es



$$ZI \text{ p ampere} - \text{vuelatas (8-1)}$$

Para cualquier número de polos.

4.2. Distorsión de Campo. La figura 18c muestra el campo magnético resultante cuando las fuerzas magnetomotrices de armadura y de excitación principal existen juntas, la densidad de flujo aumenta en las puntas *d* y *g* del polo y disminuye en las puntas *c* y *h*.

4.3. Reducción de flujo a causa de la magnetización cruzada. La figura 19 muestra parte de una gran máquina con *p* polos. En la curva *D* se muestra la distribución de flujo en el entrehierro producida por la acción sola de la fmm principal de excitación, con densidad de flujo verticalmente trazada. La curva *G* muestra la distribución de la fmm de armadura y la curva *F* muestra la distribución de flujo resultante con la acción de ambas. Como los dientes de armadura están saturados a densidades normales de flujo, el aumento en densidad en *f* es menor que la disminución en *e*, de modo que el flujo total por polo disminuye por el efecto de magnetización cruzada de la armadura.

4.4. Efecto de desmagnetización del desplazamiento de carbones. La figura 20 muestra el campo magnético que produce la fmm de armadura con los carbones desplazados en un ángulo para mejorar la conmutación. El campo de armadura ya no está en ángulo recto con respecto al campo principal, pero puede considerarse como la resultante de dos componentes, uno en la dirección *OY*, llamado componente de magnetización cruzada y estudiada en el párrafo 4.3 y la otra en la dirección *OX*, que se denomina componente desmagnetizante porque directamente se opone al campo principal. La figura 21 muestra la armadura dividida para mostrar las dos componentes, y se ve que los ampere-vueltas desmagnetizantes por par de polos son

$$ZI_c \times 2$$

$$\text{Ampere-vueltas (8-2)}$$

$$P \frac{180}{\theta}$$

En donde $\frac{2}{180}$ es alrededor de 0.2 para máquinas pequeñas de polo sin conmutación en donde se usa desplazamiento de carbones. Los ampere-vueltas desmagnetizantes por polo serían

$$0.1ZI \text{ p ampere-vueltas (8-3)}$$





- **Curvas de saturación sin carga y carga plena.** La curva 1 de la figura 22 es la curva de saturación sin carga de un generador de cd. Cuando se aplica corriente de plena carga hay una disminución en el flujo útil, y por lo tanto una caída de voltaje *ab* debido al efecto de magnetización cruzada de armadura (véase párrafo 4.3). Una caída adicional de voltaje por el desplazamiento de los carbones queda compensada por un aumento en excitación $bc = 0.1ZI$ p; también se requiere una porción *cd* de la Fem. generada para vencer la caída de voltaje por la corriente en la resistencia interna de la máquina. El voltaje sin carga de 240 V requiere 8000 ampere-vueltas (Av); a plena carga a esa excitación, el voltaje terminal cae a 220 V. Para que los voltajes sin carga y a plena carga sean ambos iguales a 240 V, será necesario un campo serie de $10\,700 - 800 = 2700$ Av.



5. CONMUTACIÓN

5.1. Conmutación. Los voltajes generados en todos los conductores bajo un polo norte de un generador de cd están en la misma dirección, y los generados en los conductores bajo un polo sur están todos en dirección opuesta (Fig. 23). Circularán corrientes en las mismas direcciones como voltajes inducidos en generadores y en dirección opuesta en motores. Por lo tanto, cuando un conductor de la armadura pasa bajo un carbón, su corriente debe invertirse de un valor dado en una dirección al mismo valor en la dirección opuesta. A esto se llama conmutación.



5.2. Inversión de corriente de conductor. Si la conmutación es perfecta el cambio de la corriente en una bobina será lineal, como lo muestra la línea llena de la figura 24. Desafortunadamente, los conductores se encuentran en ranuras de acero y las autoinductancias e inductancias mutuas de la figura 25 ocasionan voltajes en las bobinas puestas en cortocircuito por los carbones. Estos voltajes producen corrientes circulantes que tienden a impedir el cambio inicial de corriente, con lo que se retarda la inversión. En casos extremos, el retardo puede ser tan fuerte como se indica mediante líneas punteadas en la figura 24. Debido a que la corriente debe invertirse antes que la bobina deje de hacer contacto con el carbón (cuando ya no hay ninguna trayectoria para corrientes circulantes), la corriente restante a invertirse en F debe descargar su energía en un arco eléctrico de la barra del conmutador a la culata de carbón. A esto se le llama descarga disruptiva o chispa de conmutación; puede quemar los bordes de las barras del conmutador y los carbones, aunque en la mayor parte de las máquinas de cd grandes y de servicio pesado se producen chispas que no son perjudiciales y, según las normas aceptadas, no se requiere conmutación sin chispa. Sin embargo, la conmutación no debe requerir trabajos de mantenimiento.



Los voltajes indeseables que ocasionan las corrientes circulantes resultan de flujos interpolares de la reacción de armadura (véase párrafo 4.1), de flujos de fuga de los conductores de armadura portadores de corriente y, en algunos casos, del flujo disperso de la punta del polo principal. Los factores benéficos que reducen las corrientes circulantes incluyen la resistencia de la bobina en cortocircuito, la resistencia de los elevadores del conmutador y la resistencia del cuerpo del carbón a las corrientes transversas. Sin embargo, el factor más importante es la caída de voltaje en el contacto deslizante entre la cara del carbón y la superficie de cobre del conmutador.

5.3. Carbones de conmutador. La mayor parte de las máquinas de cd usan carbones electrográficos con una densidad de corriente de alrededor de 60 A/in² a plena carga; éstos tienen una caída de voltaje de contacto

esencialmente constante en la superficie del conmutador de alrededor de 1 V para cargas arriba de un tercio. Esta resistencia efectiva a las corrientes circulantes es importante para la buena operación de máquinas de cd.



La resistencia cruzada del cuerpo del carbón a las corrientes circulantes puede aumentarse al seccionar el carbón en dos obleas y hacer que las corrientes cruzadas atraviesen el entrehierro entre las dos piezas. Esto ha aumentado el margen de conmutación en algunas máquinas en 7%. El uso de portacarbonos (también llamados portaescobillas) dobles, que tienen divisores metálicos entre dos carbonos en el portador, es aún más eficiente y ha aumentado el margen de conmutación hasta en 15% más que los carbonos individuales sólidos.

A menos que se usen carbonos especiales, las máquinas deben operarse durante no más de unas pocas horas a la vez con carbonos cuyas densidades sean menores que 30 A/in². Si se hace esto, en la superficie del conmutador se forma una superficie vidriada y dura que hace que se rompan los carbonos, lo que a su vez ocasiona derivaciones malas, carbonos rotos y desportillados así como desgaste excesivo del dedo del carbón.

- **Voltaje de reactancia de conmutación.** La suma de los voltajes que se inducen en la bobina de armadura, cuando es puesta en cortocircuito por los carbonos y la conmutación se encuentre en proceso, se llama *voltaje de reactancia de conmutación*. Uno de los flujos más importantes que ocasionan este voltaje es el *flujo de fuga de ranura* que se muestra en la figura 26. Ésta es la fuga de flujo resultante por la corriente en los conductores individuales de ranura, como se muestra en la figura 25. Debido a que los flujos radiales de los dientes del rotor de los conductores de ranura adyacentes se cancelan excepto en el punto C (el punto de inversión de corriente), el flujo resultante es como se muestra en la figura 26. Cuando los conductores conmutan y pasan por C, cortan el flujo mostrado ahí y esto genera el *voltaje de reactancia de conmutación*. En realidad, parte de este voltaje se debe también a los cambios de flujo de fuga en los extremos de bobina, al flujo de reacción de armadura, etcétera, pero, para mayor sencillez, sólo se muestra el importante flujo de fuga de ranura.



5.5. Polos de conmutación. Los factores benéficos descritos en los párrafos 5.3 y 5.4 que limitan las corrientes circulantes en las bobinas que se estén conmutando no son adecuados para evitar retrasos serios en la inversión de corriente. Para evitar la chispa o descarga disruptiva deben tomarse otras medidas.

Si el flujo en C (Fig. 26) pudiera ser nulificado por un flujo igual en la dirección opuesta, podrían evitarse las corrientes circulantes debidas al flujo de fuga de ranura.

La ubicación de C es fijada por la ubicación de los carbonos. Si éstos se desplazaran hacia el polo sur principal, se encontraría una posición en donde el flujo principal hacia arriba que penetra en el polo sur cancelaría el flujo hacia abajo debido a la fuga de ranura en C.

Este método se usó al principio de la historia de las máquinas de cd. Desafortunadamente, el flujo de ranura de fuga en C es proporcional a la corriente de carga de conductor, en tanto que el flujo que penetra en el polo sur no lo es. Por lo tanto, se requiere una nueva posición de los carbonos para cada cambio en la corriente de carga.

Una mejor solución es contar con polos estacionarios a medio camino entre los polos principales, como se muestra en la figura 27. Los devanados en estos *polos de conmutación* llevan la corriente de carga. Por lo tanto, el flujo que penetra en el polo en C es proporcional a las corrientes del conductor de rotor y, teóricamente, pueden cancelar los voltajes inducidos en las bobinas que son conmutados por el flujo de fuga de ranura. En el caso del motor de cd, la corriente se invierte tanto en el campo de armadura como en el de conmutación, conservándose así la debida cancelación.



Nótese que la resistencia del devanado del polo de conmutación debe ser mayor que los ampere-vueltas del devanado de armadura por polo, en la cantidad requerida para llevar el flujo necesario por el entrehierro del polo de conmutación.

Casi todas las máquinas modernas de cd usan polos de conmutación, aun cuando algunas máquinas pequeñas tienen sólo la mitad de los polos principales.



Generalmente, la punta del polo de conmutación tiene forma de costados cónicos para aproximarse a la forma del voltaje de reactancia de la forma de conmutación (véanse Figs. 27 y 28).

5.6. Voltaje de reactancia de fórmula de conmutación. Para determinar el flujo útil necesario en el entrehierro del polo de conmutación, es útil calcular el voltaje de reactancia de conmutación (el total de los voltajes inducidos en la bobina de armadura cuando se somete a conmutación). El valor aproximado de este voltaje puede calcularse mediante la fórmula siguiente:

polos L_r

$$E_c = (I_c Z T)(r/\min)(10-10) (K_1 L_r) + K_2 (PP) (4.5 + 0.2 t_s) + (3d_s + 2SP) \text{ volts}$$

trayectorias b_s

$$(8-4)$$

en donde:

I_c = corriente por conductor de armadura, en A

Z = número total de conductores de armadura

T = número de vueltas/bobina entre barras de conmutador

L_r = longitud bruta del núcleo de armadura, in

$K_1 = 18.5$ para máquinas de polo no conmutador

= 0 para máquinas con longitud de polo de conmutación

$K_2 = 1.0$ para máquinas que usan bandas no magnéticas

= 1.7 para máquinas que usan bandas magnéticas

PP = paso polar, in

t_s = número de bobina, ranuras

b_s = ancho de ranura, in

d_s = profundidad de ranura, in

SP = paso de ranura, in

Esta fórmula está basada en los trabajos de Lamme (véase Theory of Commutation por B.G. Lamme, Trans. AIEE, Oct. 1911, vol. 30).

5.7. La zona de conmutación. La zona de conmutación se define como el espacio en la periferia de armadura a través de la cual se mueve una ranura dada cuando conmutan todos los conductores que están en la ranura. En devanados acordonados, se extiende para incluir los bordes de bobina en las ranuras acordonadas. La zona de conmutación depende del número de barras de conmutación cubiertas por cada carbón.

La zona puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

(8.5)

En donde CZ es la zona de conmutación en pulgadas, SP es el paso de ranura de rotor en pulgadas, B/S es el número de barras de conmutador por ranura, Ch es acordonamiento de ranura como una fracción del paso de ranura, B/Br es el número de barras de conmutador abarcadas por carbón, Cir es el número de circuitos en paralelo en la armadura, y p es el número de polos principales.

Considérese un devanado imbricado simplex de 8 polos con tres barras por ranura, acordonado de $\frac{1}{2}$ ranura, $3\frac{1}{2}$ barras por carbón y paso de ranura de 1.05 in.

En esta máquina, todos los conductores en una ranura están conmutados mientras la periferia de armadura se mueve 2.44 in.

Esto puede verse gráficamente en la figura 28, en donde (a) muestra una ranura con seis conductores, (b) muestra un carbón cubriendo $3\frac{1}{2}$ barras, y (c) muestra la solución gráfica. En (c), el rectángulo a representa como abscisa el espacio de $3\frac{1}{2}$ barras de conmutador si estuvieran en la superficie de armadura. Ésta es la longitud para conmutar la bobina a. La ordenada representa, a una escala conveniente, el voltaje de conmutación inducido en este conductor mientras está siendo conmutado. Los rectángulos b y c son los mismos para las bobinas b y c. Como b conmuta 1 barra después que a, se muestra un espacio de barra a la derecha de a, etcétera. De manera semejante se muestran d, e y f. Normalmente, d se esperaría que empezara la conmutación al mismo tiempo que a, pero, debido al acordonamiento, empieza después, es este caso $1\frac{1}{2}$ barras después. Por lo tanto, la zona de conmutación empieza con el principio del rectángulo a y se completa al final del rectángulo f. Al sumar los espacios de las partes, éste es $3\frac{1}{2}$ barras para f, 2 barras para los pasos de e y d, y $1\frac{1}{2}$ barras por acordonamiento, o sea un total de 7 barras en la superficie del rotor, que es $1.05 \times 7/3$, o sea 2.44 in.

La suma de los rectángulos individuales suavizados por la curva A de (c) es una representación aproximada de los voltajes de reactancia inducidas en las bobinas durante la conmutación.

5.8. Distancia de guarda individual. La línea de centro de la zona de conmutación y la curva A de la figura 8-28 se encuentran a la mitad de la distancia entre las puntas adyacentes de polo principal si los carbones no se desplazan a neutro. El arco en la superficie del rotor entre las puntas de polos principales adyacentes se denomina *zona neutra*. Si la zona de conmutación se centra en este arco, los espacios que quedan en cada extremo se llaman *distancias de guarda individuales*. Por lo tanto, la distancia de guarda individual es

$$SC = (\text{zona neutra} - \text{zona de conmutación}) / 2$$

(8-6)

La distancia de guarda individual es una indicación de la probabilidad de que el flujo disperso de las puntas de

polo principal pueda fluir en la zona de conmutación. Dicho flujo no variaría con carga y distorsionaría la forma del flujo útil del polo de conmutación. La forma del flujo útil del polo de conmutación debe ser muy semejante a la de la curva A de la figura 8-28.

Por lo general, las máquinas de cd no compensadas tienen puntas de polo principal con dimensiones radiales cortas y tienen una cantidad limitada de flujo disperso en la zona neutra. La distancia mínima de guarda individual para estas dimensiones no debe ser menor que 0.6 in y no menor que 0.9 con voltajes de conmutación arriba de 3 o 4 V.

Se acostumbra que los polos principales de máquinas compensadas tengan de 2 a 3 in de profundidad para alojar las ranuras de compensación y es más probable que dispersen flujo en la zona de conmutación. Estos polos requieren distancias mínimas de guarda individual de 1.2 a 1.4 in.

Si hay alguna duda sobre el flujo de puntas que llegue a la zona de conmutación, deben hacer gráficas de flujo.

5.9. Excitación de polo de conmutación. Las figuras 18b y 19 muestran que, normalmente, el flujo debe esperarse en el área de conmutación. Este es ocasionado por los ampere-vueltas del devanado de armadura por polo. Podría reducirse a cero si los polos de conmutación tuvieran ampere-vueltas iguales y opuestos a los del devanado de armadura. Esto es .

Sin embargo, es necesario que el devanado de conmutación también produzca flujo útil en el entrehierro del polo de conmutación para contrarrestar el voltaje de reactancia de conmutación, como se muestra en la figura 27. Por esta razón, la intensidad del campo de conmutación es por lo general de 20 a 30% mayor que los ampere-vueltas de armadura por polo. Esta diferencia recibe el nombre de exceso de ampere-vueltas y el entrehierro se fija con precisión durante la prueba en fabrica mediante el ajuste del numero de calzas de acero laminado tras los polos de conmutación, para fijar la reluctancia del entrehierro para el flujo exacto requerido.

5.9. Cálculo de espacios de aire de polo de conmutación. Al ser fijo el exceso de ampere-vueltas en el devanado de polo de conmutación y un cierto voltaje de conmutación a corriente y velocidad nominales, sólo resultará un entrehierro particular de polo de conmutación en la compensación más favorable del voltaje de conmutación. La forma de la punta del polo determinará la forma de la densidad de flujo bajo ella, pero la longitud del entrehierro determinará la magnitud de la densidad.

Para contrarrestar el voltaje de reactancia de conmutación E_c , la densidad apropiada de flujo máximo necesaria en el entrehierro de polo de conmutación es

8.7

En donde E_c es el voltaje de reactancia a plena carga de conmutación a una velocidad de r/min , Z es el número total de conductores de armadura, b es el número total de barras de conmutador, D es el diámetro de armadura en pulgadas, L_c es la longitud axial de los polos de conmutación en pulgadas, y r/min son las revoluciones por minuto para las que se calculó E_c .

La longitud aproximada del entrehierro individual de polo de conmutación necesario puede calcularse por la siguiente fórmula:

8.8



Cuando la máquina está en prueba de fábrica, el exceso de ampere-vueltas puede ajustarse para obtener la mejor conmutación posible al colocar otro generador de cd o una batería en las terminales del devanado de conmutación, para sumarse a la corriente de carga que circule o para bajar el exceso al derivar parte de la corriente de carga. A esto se le conoce como prueba de elevación u oposición. A continuación se cambia el entrehierro del polo conmutador para obtener la mejor densidad de flujo del entrehierro con el exceso real de ampere-vueltas. El nuevo entrehierro será

8.9

5.10. Dimensiones de polos de conmutación. Si el flujo útil entre el entrehierro de aire de un polo de conmutación no es proporcional a la corriente de carga de la máquina, la compensación del voltaje de reactancia de conmutación no será correcta para todas las cargas y las descargas disruptivas pueden dañar los carbones y el conmutador. Por lo tanto, el polo de conmutación no debe saturarse a las corrientes de carga más elevadas para ajustarse. La base del polo debe llevar no sólo el flujo útil del entrehierro, sino también los flujos de fuga de las bobinas de campo de conmutación y principal que estén cerca. Estos flujos de fuga son relativamente grandes y deben determinarse con cuidado mediante el trazado del flujo si existe el riesgo de que se sature el polo de conmutación.

La cantidad de flujo de fuga por la base del polo depende de la longitud de las trayectorias de fuga, del número de ampere-vueltas de bobina y la ubicación del campo de conmutación. Las trayectorias de fuga deben hacerse tan largas como sea factible, los ampere-vueltas de bobina tan poco como sea razonable y la bobina de conmutación ubicarse tan cerca de la punta del polo como sea posible. Igualmente, todas las secciones del polo de conmutación deben ser lo suficientemente grandes para dar espacio al flujo.

Para una máquina compensada normal, el flujo de fuga será alrededor de 75% del flujo útil del polo de conmutación, o sea como 140% del flujo útil de una máquina no compensada.

El flujo útil aproximado se puede calcular al usar la densidad máxima de flujo de entrehierro de polo de conmutación de la ecuación (8-7). La densidad promedio de flujo de la zona de conmutación será aproximadamente

$$B_a = 0.83 B_m \quad 8.10$$

La densidad de flujo en sobrecarga en la base del polo es

8.11

En donde K_3 es 1.75 para máquinas compensadas y 2.40 para máquinas no compensadas, K_4 es la razón de corriente de sobrecarga a corriente nominal, B_a es la densidad promedio de flujo en la zona de conmutación, CZ es el ancho de la zona de conmutación, L_c es la longitud axial del polo de conmutación y W_c es el ancho circunferencial del polo en su base. B_{cp} no debe ser mayor que 80000 a 90000 líneas/in² para una buena conmutación.

5.11. Devanados de compensación. Aun cuando el polo de conmutación es una buena solución para conmutación, no impide la deformación del flujo de polo principal por reacción de armadura. En la figura 30 se muestra el flujo puesto en la cara del polo principal por la fmm de armadura. Si la cara polar está provista de otro devanado, como se muestra en la figura 31, y está conectada en serie con la carga, se puede poner una fmm igual y opuesta a la de la armadura. Esto tendería a impedir la deformación del campo del entrehierro por reacción de armadura. Dichos devanados se denominan *devanados de compensación* y por lo general se instalan en máquinas de cd de tamaño medio y grande para obtener las mejores características posibles; muchas veces, también se requieren para hacer máquinas menos susceptibles a descargas disruptivas (véase párrafo 5.12).

El uso de devanados de compensación reduce el número de vueltas requerido en los campos de polo de conmutación, y esto materialmente reduce los flujos de fuga en el campo y, a su vez, las saturaciones del polo a corrientes elevadas. Los ampere-vueltas en el campo de conmutación se reducen en alrededor de 50% con el uso de un campo de compensación. Este nuevo devanado puede ser considerado como algunas de las vueltas eliminadas del devanado del polo de conmutación y reubicadas en ranuras de las caras del polo principal.

El número y ubicación de las ranuras de compensación debe seleccionarse cuidadosamente para igualarse tanto como sea posible a los ampere-vueltas por pulgada del rotor. Sin embargo, la separación de ranuras no debe corresponder cercanamente a la del rotor ya que esto ocasionaría un cambio importante en la reluctancia al flujo útil del polo principal cada vez que el rotor se moviera de una posición en donde las ranuras del rotor y el estator coincidieran todas en donde las ranuras del rotor coincidieran con los dientes del estator. Esto ocurriría una vez por cada movimiento de paso de ranura. Los rápidos cambios resultantes en el flujo útil ocasionarían rizos en el voltaje de salida y también fuerte ruido magnético. Si se usan muy pocas ranuras, se presentan distorsiones de flujo locales y el devanado de compensación pierde parte de su efectividad (véase Fig. 33).

La compensación de reacción de armadura reduce efectivamente la inductancia del circuito de armadura, lo que hace que la máquina sea menos susceptible a los malos efectos de los voltajes $L (di/dt)$ ocasionados por cambios muy rápidos de la corriente de carga.

Durante la fabricación es posible colocar el devanado de compensación en forma asimétrica alrededor de la línea central del polo principal; esto ocasiona un flujo de eje directo que dará un efecto de campo en serie (Fig. 32). Para la composición acumulativa del generador, las ranuras deben desplazarse en la dirección de la rotación de la máquina. Este desplazamiento dará una composición diferencial de motor. El efecto no puede ajustarse después de la manufactura. Raras veces excede $\frac{1}{2}$ in y esto no reduce materialmente la efectividad de la compensación.

5.12. Volts por barra. El grosor de la mica entre los segmentos del conmutador depende del diseño de la máquina y varía de 0.020 in en máquinas pequeñas hasta 0.050 in en unidades grandes. Aun cuando normalmente se requerirían varios cientos de volts para saltar estas distancias, la presencia de aire ionizado por el chisporroteo y la de polvo de carbón conductor hacen necesario que el voltaje entre segmentos se mantenga en valores bajos. Si un arco de baja resistencia salta entre segmentos, eleva los voltajes entre las barras restantes y también tiende a ionizar un poco de aire para formar trayectorias conductoras en el resto de las barras. Si esto continúa hasta puentear todos los segmentos entre brazos de carbones de polaridad opuesta, entonces ocurre una *descarga disruptiva* y pueden ocasionarse graves daños al conmutador, carbones y portacarbones (también llamado portaescobillas).



Debido a que el voltaje más alto entre barras es el detonador que inicia la descarga, éste es un límite importante. Los volts promedio por barra tienen poco significado. La figura 29 muestra que los volts máximos por barra dependen de la forma del campo. Para la máquina no compensada que se muestra, el máximo de volts entre segmentos existen en w . Los segmentos conectados a conductores en x tienen mucho menos voltaje entre ellos, y los que se encuentren a mayor distancia del borde del polo casi no tienen nada.

La relación entre volts máximos por barra y el promedio depende de los ampere-vueltas de armadura por polo y de la curva de saturación del entrehierro y dientes en las puntas del polo. Al despreciar la pequeña caída de voltaje en los devanados de conmutación y serie, el voltaje entre los brazos de carbón es el voltaje V de la máquina, y el número de barras entre brazos es B/p . Por lo tanto

8.12

En donde B es el número total de barras de conmutador y p es el número de polos principales.

Incluso si no existe distorsión, sólo los conductores bajo las caras polares generan voltaje y los volts promedio corregidos por barra serían

En donde es la razón de arco polar a paso polar, alrededor de 0.65, representada por D en la figura 8-29. Sin embargo, los volts máximos por barra en 2 son más que esto, como la altura w es mayor que D , o sea

8.13

En la práctica, el valor de w/D para una máquina no compensada a plena potencia del campo principal varía de alrededor de 1.7 a 1.9. Sin embargo, cualquier reducción en la saturación ocasiona que se amplifiquen los efectos de los ampere-vueltas de armadura (que causan la distorsión). El diseñador debe comprobar el valor real de w/D , que puede ser de hasta 4.5 para un motor de cd en una potencia débil de campo principal (alta velocidad). Esto es evidente en la figura 8-33. El efecto distorsionador para la condición de alta velocidad (flujo de bajo promedio) ϕ_{02} eleva el flujo máximo a ϕ_{w2} , que es más de tres veces el cambio para la condición saturada (baja velocidad) ϕ_{01} a ϕ_{w1} con los mismos ampere-vueltas X distorsionadores.



El uso de un devanado de compensación tiende a eliminar la distorsión de flujo, y para condiciones saturadas la curva de flujo coincide bien con la curva D sin carga de la figura 29. Sin embargo, en condiciones de baja saturación, los devanados de compensación estacionarios permiten distorsiones de flujo localizadas, mismas que se muestran en la figura 34. Distorsiones semejantes se presentan a densidades bajas de flujo principal en generadores de cd, pero el voltaje V de salida se reduce en la misma proporción que el flujo principal, y el voltaje máximo entre barras no se ve afectado seriamente.

A campo completo, en motores o generadores bien compensados, w/D tiene un valor de 1.4 a 1.5. Los motores de corriente directa en campo débil pueden tener razones de 2.0 o más. En cualquier máquina dudosa, el diseñador debe comprobar con cuidado este valor.

Los límites aproximados seguros de volts máximos por barra son 40 V para motores y 30 V para generadores, en máquinas que tengan mica con grosor de 0.040 in entre segmentos.

5.13. Curvas de Potencial de carbón. Cuando se forman chispas por conmutación en una máquina de cd, el usuario puede sospechar que el entrehierro del polo de conmutación no está ajustado correctamente. Muchas veces, las curvas de potencial de carbón se toman para probar o desaprobar estas sospechas.

Las curvas se toman al medir las caídas de voltaje entre el carbón y la superficie del conmutador en cuatro puntos cuando la máquina opere a velocidad constante y corriente de carga (véase Fig. 35). Los voltajes en 1, 2, 3 y 4 se toman al tocar la superficie del conmutador con la punta afilada de un lápiz de madera. El circuito se completa con alambres y se muestra un voltímetro de baja lectura.



Luego se grafican los voltajes. Una curva como la A de la figura 35 puede indicar subcompensación debida a un espacio demasiado grande de polo de conmutación. La curva C puede indicar sobrecompensación con demasiada densidad de flujo en el entrehierro del polo de conmutación. La curva B es típica de una buena compensación.

La justificación para estas conclusiones se basa en la teoría de que la mejor conmutación (inversión de corriente de bobina) será lineal mientras la bobina pasa bajo el carbón. Esto es posible sólo si no hay corrientes circulantes. La subcompensación debe ocasionar corrientes circulantes que congestionarían al borde de salida del carbón y causarían un alto voltaje en el punto 4. La sobrecompensación invertiría la corriente demasiado pronto y en realidad invertiría la caída del voltaje en el punto 4.

Incluso para un experto, esta prueba es sólo un indicador de que se requieren pruebas más definitivas, como la prueba de elevación u oposición (véase y ecuación (8-8)). Muchos otros factores, incluyendo el deslizamiento de los carbones, las condiciones de la superficie del conmutador, chisporroteo, etcétera, influyen en las lecturas. Cuando se requieran cambios en una máquina, debe consultarse al fabricante.

6. DISEÑO DE ARMADURA

6.1. Ecuación Fem. Si 108 líneas (Mx) de flujo son cortadas por un conductor en 1 s, en el mismo se induce 1 V (véase párrafo 9). Por lo tanto, el voltaje inducido de una máquina de cd es

8.14

6.2. Ecuación de Salida. La ecuación (8-14) se convierte a salida de watts si ambos lados se multiplican por la corriente de carga I_L , $I_c \times C$. La fórmula puede entonces reacomodarse

8.15

en donde D es el diámetro de armadura y L es la longitud total de núcleo de armadura, B_g es la densidad de entrehierro de polo principal en maxwells (líneas), $\frac{2\pi}{q}$ es la razón de arco polar a paso polar, q es ZI/D (un factor útil de carga) y Φ_t es el flujo total de entrehierro igual a

8.16

6.3. Velocidades de rotor. Las normas enumeran las velocidades de generadores de cd tan altas como sea razonable para reducir su tamaño y costo. Esta relación se ve de la ecuación 8-15. Las velocidades pueden ser limitadas por la conmutación, volts máximos por barra, o las velocidades periféricas del rotor o conmutador. Los conmutadores de generadores raras veces rebasan los 5000 ft/min, aun cuando los conmutadores de los motores pueden exceder de 7500 ft/min a altas velocidades; los rotores de generadores raras veces sobrepasan los 9500 ft/min. La figura 36 muestra velocidades estándar típicas. Si la unidad motriz primaria (por ejemplo un motor Diesel) requiere velocidades más bajas que éstas, los generadores se pueden diseñar para ello pero resultan máquinas más grandes.



6.4. Diámetros del rotor. Los generadores conmutadores difíciles se benefician con el uso de diámetro grandes de rotor, pero los diámetros están limitados por los mismos factores que las velocidades de rotor enumeradas líneas arriba. La longitud resultante de armadura no debe ser menor que 60% del paso polar, debido a que una porción tan pequeña de la bobina de armadura se usaría para generar voltaje. Los diámetros típicos de generador se muestran en la figura 37.



Las velocidades de motores de corriente directa deben adaptarse a la aplicación, y muchas veces el diámetro del rotor se selecciona para satisfacer las necesidades de inercia de la aplicación. Las longitudes del núcleo pueden ser tan grandes como el diámetro. Dichos motores son, en general, de ventilación forzada.

6.5. Número de polos. Por lo general, el diámetro del rotor fija el número de polos principales. Los pasos polares típicos van de 17.5 a 20.5 in en máquinas medianas y grandes. Cuando sea posible una selección, los generadores de alto voltaje utilizan menos polos para permitir espacio de más voltaje en el conmutador entre los brazos de carbones. Sin embargo, los generadores para corrientes elevadas necesitan muchos polos para permitir más brazos de carbones portadores de corriente y conmutadores más cortos. Los conmutadores de 1000 a 1250 A / (brazo de carbón) (polaridad) son costosos, y deben usarse valores menores cuando lo permitan los troqueles existentes.

6.6. La densidad Bg de flujo de entrehierro del polo principal. Esta densidad está limitada por la densidad en el fondo de los dientes del rotor. El cono reducido en los dientes de grandes rotores permite densidades más altas del entrehierro, como se muestra en la figura 38.

6.7. Número de conductores por pulgada de circunferencia (q) de rotor. Este número está limitado por el calentamiento del rotor, la conmutación y, a veces, por la saturación de polos de conmutación. Los valores aproximados aceptables de q se muestran en la figura 39.



6.8. Diámetro del conmutador. Por lo general, este diámetro es de alrededor de 55 a 85% del diámetro de rotor, dependiendo de las medidas disponibles para el diseñador. El calentamiento también puede limitar la selección.

6.9. Carbones y portacarbones. Estas piezas se seleccionan de diseños disponibles para limitar la densidad de corriente de carbones entre 60 y 70 A/in² a plena carga, para obtener la distancia de guarda individual necesaria, y para obtener un calentamiento aceptable del conmutador.

6.10. Selección de un diseño aproximado. Considérese un generador con capacidad para 2500 Kw., 700 V, 3571 A y 514 r/min. De las figuras 39 y 40



El examen de los datos indica que el diseño parece factible, y por tanto se puede continuar.



El examen de estos datos también indica que el diseño propuesto es razonable.

6.11. Ranuras y bobinas de armadura. La profundidad de una ranura de armadura está limitada por varios factores, incluyendo la densidad de diente, pérdidas de remolino en los conductores de armadura, profundidades disponibles de núcleo y conmutación. Para frecuencias razonables (hasta 50 Hz en máquinas de cd medianas y grandes), se pueden usar ordinariamente ranuras de 2 in de profundidad.

Los *pasos aceptables de ranura* van de 0.75 a 1.5 in. Las máquinas pequeñas tienen ranuras de menor profundidad y menores límites de pasos de ranura. Para máquinas de tamaño medio y grande, por lo general resulta una densidad razonable de diente si la razón del ancho de ranura al paso de ranura es de alrededor de 0.4.

Las *pérdidas de remolino* en los conductores pueden ser grandes en comparación con sus pérdidas I²R. A veces, éstas deben reducirse al formar cada conductor de armadura mediante varios hilos de alambre aislado de cobre; el número de hilos y su medida depende de la frecuencia y la profundidad total del conductor. Una fórmula aproximada para encontrar las pérdidas razonables de remolino es

En donde f es la frecuencia en hertz, $(r/\text{min} \times \text{polos}) / 120$, y d_c es la profundidad total de un conductor.

El espacio de aislamiento requerido depende del tipo usado. Los hilos típicos de conductores tienen aproximadamente 0.018 in en total de hilo y barniz. Los envoltentes de mica, cinta de aislar y barniz, así como la tolerancia de ranura para acabado (0.010 in) totalizan alrededor de 0.085 in en el ancho de bobina. Si se incluye el espacio para la cuña y su retén, las dos bobinas hacia lo profundo totalizan como 0.315 in (véase Fig. 40).

6.12. Diseño aproximado de ranura.



7. CAMPOS DE COMPENSACIÓN Y CONMUTACIÓN

7.1. Datos de compensación del devanado. Véase párrafo 33. El devanado de compensación debe ser casi igual a los ampere-vueltas de armadura por pulgada, debe evitar el ocasionar ruido magnético y debe resultar en un máximo aceptable de volts por barra (véase párrafo 34). Las máquinas para calentamiento de 40°C tendrán densidades de barra de compensación de alrededor de 2500 a 3000 A/in². La sección de punta de polo limitará la profundidad máxima de la barra de compensación. Las áreas localizadas de alta densidad de flujo se deben evitar en donde el flujo debe estrecharse entre la superficie de zapata polar y el fondo de la ranura de compensación.

Para diseños de una sola barra de compensación por ranura, el ancho típico requerido para aislamiento, barniz y factor de apilamiento es alrededor de 0.140 in. Con el espacio de cuña incluido, el requerimiento de profundidad de aislamiento es aproximadamente de 0.400 in.

7.2. Cálculos del devanado de compensación.



7.3. Cálculos del devanado de conmutación. Véase el párrafo 30. El total de ampere-vueltas de conmutación y de compensación por polo debe ser alrededor de 120 a 130% de los del rotor.



Las bobinas de conmutación bien ventiladas pueden tener densidades de 2000 a 2500 A/in² (véase Fig. 49).

7.4. Cálculos de conmutación.



8. CÁLCULOS MAGNÉTICOS

8.1. Trayectorias de flujo. La figura 41 muestra las trayectorias del flujo de polo principal para una máquina típica de tamaño medio; no se muestran los polos de conmutación ni las ranuras de compensación. En los cálculos de saturación interviene sólo la mitad de la longitud de una espira completa de flujo, porque eso es todo lo que contiene una bobina de campo. Excepto para el entrehierro del polo principal y los ampere-vueltas de diente de rotor, los cálculos son sencillos; requieren (1) la determinación de densidades de

flujo al dividir el flujo en una sección entre su área de sección transversal, (2) leyendo una curva de magnetización para el material de que se trata, para hallar los ampere-vueltas por pulgada necesarios para la densidad y (3) hallando los ampere-vueltas totales para la parte al multiplicar la longitud de la porción de la trayectoria de los ampere-vueltas por pulgada. En la figura 42 se ilustran las curvas típicas de magnetización.



Por lo general, el núcleo de rotor está fabricado de laminaciones de hoja de acero de 0.017 a 0.025 in de grueso. Debido a las rebabas y recubrimientos superficiales, un factor de apilamiento de 93% es común; los polos principales usan laminaciones más gruesas y un factor de 95% es común. Si el bastidor también está hecho de laminaciones, es necesario un factor similar. Por supuesto, un bastidor sólido utiliza toda su área.

Debe incluirse el flujo de fuga ($\frac{1}{2}$ e) de la figura 41 de las bobinas principales de campo, con el flujo útil del yugo de bastidor y el cuerpo polar. Los cálculos dependen de las dimensiones reales de la máquina y de los ampere-vueltas de campo principal. Sin embargo, los ampere-vueltas en estas partes representan sólo una pequeña porción del total requerido para toda la trayectoria, y por lo general tiene la precisión suficiente para estimar esta fuga a 12% del flujo útil normalmente y 20% a saturaciones altas. Para cálculos precisos se puede trazar la fuga verdadera. No se consideran flujos de fuga en el cálculo de densidades de entrehierro, dientes o de núcleo.

8.2. Coeficiente de Carter y ampere-vueltas de entrehierro. La presencia de ranuras de rotor, ranuras de compensación y ductos de respiración en el generador ocasiona que las densidades reales en el entrehierro de polo principal sean más grandes para un núcleo sólido y uniforme. Además, las longitudes promedio de las trayectorias de flujo son más largas (véase Fig. 43). Los dos efectos pueden concentrarse suponiendo que el entrehierro sea mayor que el medido en forma mecánica. Al considerar los tres factores (ranuras de rotor, ranuras de compensación y respiraderos) en sucesión la fórmula



8.18

Indica el primer entrehierro corregido G_1 ; muy de cerca, ésta calculará el entrehierro efectivo.

Los ampere-vueltas en el entrehierro serán

8.19

8.3. Los ampere-vueltas de dientes de rotor. Para las densidades de diente menores que 100 000 líneas/in², las caídas de ampere-vueltas en un diente son tan bajas que prácticamente no pasará flujo por la ranura adyacente debido a la reluctancia tan grande del aire. Sin embargo, a medida que aumentan las densidades de flujo de diente, producen caídas muy elevadas de ampere-vueltas de la parte superior del diente a la parte inferior debido a la saturación. Como estos ampere-vueltas también están en la trayectoria paralela de flujo en la ranura adyacente, cuando son suficientemente grandes, parte del flujo útil pasará bajo la ranura, descongestionará al diente de parte de su flujo y reducirá su densidad real. Si la densidad aparente del diente se calcula será menor que la aparente, dependiendo de la cantidad de saturación.

En la figura 44 se muestra la relación entre la densidad aparente de diente t_a y la densidad real de diente t_r , para diferentes razones de área de aire a área de hierro en cualquier sección del diente.

La K de estas áreas es

8.20

Para la precisión al calcular ampere-vueltas de diente, es deseable dividir el diente en varias partes, hallar la caída de ampere-vueltas en cada sección y totalizarlas. La densidad de flujo se encuentra en la parte media de cada sección, y la razón K se calcula en dicha parte media.

8.4. Cálculo de datos de saturación sin carga. Si se considera el generador de 2500 Kw., 700 V, 3571 A y 514 r/min del párrafo 45, se tienen los valores que se indican en la tabla 8-1. Usando las curvas de magnetización de la figura 8-42 y estos datos, la curva de saturación sin carga se calcula para varios voltajes. Nótese que se escoge 721 V en la tabla 8-2 con la suposición de que la caída IR en el generador no rebasará 3% o 21 V en este caso. El generador (Fig. 8-45) debe tener este voltaje adicional inducido en el mismo para un voltaje terminal de 700 V. En el caso de un motor, el voltaje inducido será menor por la cantidad de caída IR, o sea 679 V.

8.5. Curva de saturación a plena carga para máquina compensada. La figura 8-46 muestra la curva calculada de saturación sin carga. Para una máquina bien compensada, los carbones tendrán un desplazamiento muy pequeño o ninguno, y en esencia no se perderá flujo útil debido a la reacción de armadura. Sólo es necesario considerar la caída IR de resistencia de circuito de armadura, y los ampere-vueltas de excitación a plena carga requeridos se pueden leer directamente de la curva de saturación sin carga al voltaje inducido.



Para el generador de 2500 Kw., La excitación requerida a 721 V es 7520 Av a plena carga.

8.6. Curva de saturación a plena carga para una máquina no compensada. Con polos de conmutación no hay necesidad de desplazamiento de carbones, pero la reacción no compensada de armadura resultará en pérdida de flujo útil al aumentar la carga. La figura 47 muestra un método de calcular la excitación adicional de ampere-vueltas para reponer este flujo perdido.

OBD = curva de saturación de entrehierro mas cara de diente y polo.

BC = Caída IR en circuito de armadura mas la caída de carbón. B = cualquier punto escogido en la curva OBD.

FB = BE = Av/arco de polo de armadura a plena carga, o sea Av/p^* trazada en una línea horizontal.



Por E y F trazar líneas verticales de longitud infinita. Mueva la línea GI verticalmente hacia arriba o hacia abajo paralela a FBE a una posición GHKI, de modo que el área JGHOJ = área HBDIKH.



Por B trace una línea vertical BCK. Luego HK = ampere-vueltas de distorsión para la corriente de carga considerada para el punto B.

Por C trace una línea horizontal de longitud infinita que corte la curva de saturación sin carga en A.

$CP = HK$, a extenderse de la derecha en C.

AP = ampere-vueltas totales requeridos a corriente de carga considerada para mantener la carga al mismo valor que sin carga.

Al escoger varios puntos como por ejemplo B, a lo largo de la curva de saturación y hacer los mismos cálculos para cada punto, se puede producir una curva de saturación a plena carga o a cualquier carga.

8.7 Calculo de volts máximos por barra. Los ampere-vueltas de distorsión, que resultan por una compensación imperfecta de los ampere-vueltas de armadura por el devanado de compensación, se encuentran al trazar las dos y observar la diferencia máxima. Esto se hace en el punto de máxima corriente de sobrecarga.

El factor de distorsión (figs. 33 y 46) se determina a partir del entrehierro y la curva de saturación de dientes. A doble carga, el voltaje inducido se considera que es 740V.



9. CAMPOS PRINCIPALES

9.1. Campo principal y calentamiento de campo principal. Las figuras 48 y 49 muestran tres tipos de campos principales de cd; las máquinas pequeñas utilizan comúnmente los de la figura 48. Estos campos se devanan en moldes y luego se deslizan en los polos. El tipo A se devana en un carrete aislador, y el tipo B utiliza un carrete aislado de acero para mejor transferencia de calor y protección mecánica.

El montaje de la figura 49 es común en máquinas de cd grandes y medianas. Las vueltas de la sección interior se devanan apretadamente en el cuerpo polar aislado para evitar espacios de aire entre el polo y la bobina, lo que permite máxima transferencia de calor. La segunda sección está separada de la bobina interior para permitir que el aire de enfriamiento circule sobre el área máxima superficial posible. El grueso de una sección de bobina está limitado alrededor de $1\frac{1}{4}$ a $1\frac{3}{4}$ in para un gradiente pequeño de temperatura dentro de la bobina.

Los tres tipos pueden usar alambre aislado con barniz, doble cubierta de algodón o astillas de vidrio en barniz. Deben evitarse las burbujas de aire que actúan como barreras para la transferencia de calor, por lo que el alambre rectangular es común. Además, el barniz y la resina se aplican libremente durante el devanado o se aplican por impregnación de vacío una vez devanada la bobina.

No se pueden establecer criterios de diseño apropiados para todas las máquinas de cd porque el enfriamiento del campo depende de las presiones de aire de la rotación de armadura, las superficies de paso de aire por los campos y la radiación de calor de las partes adyacentes. Estos factores pueden variar con el diseño de la máquina. Sin embargo, en generadores de cd autoventilados de tamaño mediano y grande (construidos como en la Fig. 49), los datos empíricos son útiles.

Los campos principales reciben calor no sólo de sus propias pérdidas de I^2R , sino también del calor radiado de la armadura caliente y las bobinas de conmutación. Además, el aire que enfría las bobinas ya ha sido calentado por el rotor, lo cual reduce el gradiente de temperatura para enfriar las bobinas. El calentamiento de los campos debe calcularse, no con base en la temperatura real del aire sino en la menor temperatura del aire del ambiente fuera de la máquina. La figura 50 muestra datos empíricos para dichas máquinas típicas autoventiladas de tamaño mediano y grande, construidas como se indica en la figura 49.

El área superficial para estas curvas incluye toda la periferia de la bobina, debido a que la transferencia de calor al cuerpo polar es tan efectiva como para las superficies enfriadas por aire.

Poco se gana en enfriamiento con aumentar las velocidades de rotor arriba de 5000 ft/min, debido a que la mayor parte del aire de armadura pasa por el área limitada de la estructura de campo. A altas velocidades de rotor, el aire se reduce debido a las caídas de presión por la velocidad alta.

9.2. Cálculos de campo principal. Estos cálculos se hacen al efectuar un trazo similar al que se ilustra en la figura 49, lo que permite el cálculo de la longitud media aproximada de vueltas (MLT) para las secciones.

Los medios de excitación y la aplicación particular, por lo general, determinan la caída de IR del campo principal; éste se satisface en diseño por la selección del área de sección transversal del alambre de campo, que se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$8.21$$

En donde Av/p es el número necesario de ampere-vueltas por polo, MLT es la longitud media de vueltas, p es el número de bobinas en serie y por último IR es la caída de voltaje requerida.

Los cálculos de campo típicos son

*** form o revisar ***

Estos datos indican un campo aceptable.

10. ENFRIAMIENTO Y VENTILACIÓN

10.1. Causa de calentamiento. Las pérdidas en una máquina de cd ocasionan que la temperatura de las partes se eleve, hasta que la diferencia de temperatura entre sus superficies y el aire de enfriamiento sea lo suficiente grande como para disipar el calor generado.

10.2. Elevaciones permisibles de temperatura media. Las elevaciones permisibles en la temperatura de las partes están limitadas por la temperatura máxima de "lugar caliente" que el aislamiento puede resistir y aún tener vida útil razonable. Las temperaturas máximas superficiales están fijadas por el gradiente de temperatura por el aislamiento desde el lugar caliente hasta la superficie.

Las normas de aislamiento del IEEE han establecido las temperaturas de límite para lugar caliente para sistemas de aislamiento. La norma C50.4 del American National Standards Institute para máquinas de cd enumera los gradientes típicos para esos sistemas e indica calentamientos aceptables de superficies y de promedio de cobre arriba de las temperaturas especificadas, para diversos recintos en máquinas y ciclos de trabajo. Los valores típicos son elevaciones de 40°C para sistemas Clase A, 60°C para Clase B y 80°C para Clase F en bobinas de armadura. Por lo general, los sistemas Clase H contienen siliconas y raras veces se usan en máquinas de cd de tamaño mediano y grande. Los vapores de siliconas pueden ocasionar un desgaste muy acelerado en los carbones del conmutador e intenso chisporroteo, en particular en máquinas cerradas.

10.3. Gradientes de temperatura en bobinas de rotor. La figura 8-51 representa un conductor por el que fluye corriente, aislado de la ranura de núcleo en la que está incrustado. El lugar caliente está probablemente en la línea de centro del núcleo y cerca del centro del conductor. Es muy factible que el calor se propague a lo largo del conductor hasta la vuelta final y también por el aislamiento hasta el hierro. La cantidad de calor que circule en cada dirección es difícil de calcular; del mismo modo, las variaciones en las bobinas, como el relleno de resina y el apretujamiento en las ranuras, hacen difícil predecir los factores de conductividad del calor.

10.4. Calentamiento de conexiones finales de devanados de armadura. Muchas veces, las máquinas pequeñas tienen devanados finales sólidos unidos con bandas o están equipados con soportes de bobina aislados tipo repisa. Las máquinas más grandes están más cargadas por unidad de volumen y por lo general tienen soportes de bobina angostos, espacios de aire entre vueltas finales y aire de ventilación que limpia tanto la superficie superior como la inferior de las extensiones de bobina.

Con esta construcción, el producto permisible de conductores de corriente por pulgada de circunferencia exterior multiplicado por los amperes por pulgada cuadrada para varias velocidades de rotor, se muestra en la figura 8-52 para un calentamiento de 40°C en las vueltas finales.

10.5. Calentamiento de conmutador. En la figura 8-53 se ilustra una armadura de cd moderna. El diámetro del conmutador varía de 55 a 85% del núcleo de rotor, y los cuellos de conmutador que unen las barras con las extensiones de devanado de rotor están generalmente separados uno de otro por espacios de aire, de modo que, cuando la armadura gira, se establece una circulación de aire como lo indican las flechas.

Una relación típica entre watts permisibles por pulgada cuadrada de superficie de conmutador y su velocidad periférica se ilustra en la figura 8-53. La superficie radiante es la circunferencia del conmutador multiplicada por su longitud de cara; no se incluye el área de cuello.

El calor a disiparse es el que se debe a la fricción de los carbones y a las pérdidas I^2R por contacto de carbones. Puede haber otras pérdidas debidas a mala conmutación, desportillamiento de los carbones, superficie de conmutador y, si es así, el calentamiento será mayor que el indicado en la figura 53. Si la conmutación es muy buena y el deslizamiento de los carbones es excelente, la temperatura será menor.

10.6. Aplicación de constantes de calentamiento. Los párrafos que se relacionan con el diseño de armadura, campos principales, devanados de compensación y devanados de conmutación abarcaron datos típicos de carga como son los conductores de corriente por pulgada, amperes por pulgada cuadrada, densidades de flujo y watts por pulgada cuadrada de superficie de enfriamiento. Los datos más precisos dependen de los arreglos exactos utilizados en un diseño en particular. Si es posible, el nuevo diseño debe ser comparado con máquinas similares que ya hayan sido probadas. Cualesquier variaciones en el recinto de máquinas que restrinja o aumente la ventilación afectará las elevaciones de temperatura.

11. PÉRDIDAS Y EFICIENCIA

11.1. Pérdida I^2R de cobre de armadura. A 75°C la resistividad de cobre es 8.25 x. Por lo tanto, para un devanado de armadura de Z conductores, cada uno con una longitud de $MLT/2$ (la mitad de una vuelta de longitud media de la bobina), cada uno con un área de sección transversal de A y dispuesto en varios circuitos paralelos, la resistencia es

8.26

La MLT (vuelta de longitud media) se encuentra mejor por diseño, pero un valor aproximado es

$$MLT = 2 \left((1.35) (\text{paso polar}) + (\text{longitud de rotor}) \times 3 \right) \quad (8-27)$$

También hay pérdidas de corriente parásita en las bobinas del rotor, pero éstas pueden mantenerse al mínimo por el entramado de conductor de acuerdo con la ecuación (8-17); en la pérdida de carga se incluye una tolerancia para estas pérdidas.

11.2. Pérdidas I^2R de campo de compensación, de conmutación y serie. Estos cambios también transportan la corriente de línea, y las pérdidas I^2R se encuentran fácilmente cuando se conoce la resistencia de las bobinas. Su MLT se encuentra en diagramas. A 75°C

En donde R es la resistencia de campo en ohms, T es el número de vueltas por bobina, p es el número de polos, MLT es la longitud media de vuelta y A es el área del conductor. El total de estas pérdidas oscila entre 60 y 100% de la I^2R de armadura para máquinas compensadas y es menor que 50% para máquinas no compensadas.

11.3. La pérdida I^2R de Carbones. Esta pérdida es ocasionada por la corriente de carga que pasa por la caída de voltaje de contacto entre los carbones y el conmutador. La caída de contacto se supone que es 1 V.

Pérdida I^2R del carbón = 2 (amperes de línea) watts (8-29)

11.4. Pérdida de carga. La presencia de corriente de carga en los conductores de armadura resulta en distorsiones de flujo alrededor de las ranuras, en el entrehierro y en las caras polares. Estas distorsiones causan pérdidas en los conductores y en el hierro que son difíciles de calcular y medir. Se ha fijado un valor estándar en 1% de la salida de máquina.

Pérdida de carga = 0.01 (salida de máquina) (8-30)

11.5. Pérdida de campo en derivación. Los cálculos de calentamiento se relacionan sólo con la pérdida I^2R de cobre de campo. Se acostumbra, sin embargo, cargar la máquina con cualesquiera pérdidas de reóstato al determinar la eficiencia. Por lo tanto,

Pérdida de reóstato y campo en derivación = $I_f V_{ex}$ watts (8-31)

En donde I_f es la corriente total de campo y V_{ex} es el voltaje de excitación.

11.6. Pérdida de núcleo. Como se ve en la figura 8-54, el flujo en cualquier porción de la armadura para por $p/2$ c/r (ciclos por revolución) o por $(p/2) (r/min)/60$ Hz.

Las *pérdidas de hierro* están formadas por la pérdida de histéresis, que es igual a $K .6fw$ watts, y la pérdida de corriente de remolino, que es igual a $K_e (ft)^2w$ watts. K es la constante de histéresis del hierro usado, K_e es una constante inversamente proporcional a la resistencia eléctrica del hierro, f es la densidad máxima de flujo en líneas por pulgada cuadrada, f es la frecuencia en hertz, w es el peso en libras, y t es el grueso de las laminaciones del núcleo en pulgadas.

La pérdida de remolino se reduce al usar hierro con resistencia eléctrica tan alta como sea factible. El hierro de muy alta resistencia presenta una tendencia a tener baja permeabilidad de flujo y a ser mecánicamente quebradizo y costoso; raras veces se justifica su uso en máquinas de cd. La pérdida se mantiene a un valor aceptable mediante el uso de laminaciones delgadas de núcleo, de 0.017 a 0.025 in de grueso.

Otra pérdida importante es la pérdida de cara polar. La figura 43 muestra la distribución de flujo en el entrehierro de una máquina de cd. Cuando gira la armadura y los dientes se mueven frente a la cara polar, se inducen fuerzas electromotrices (Fem.) Que tienden a hacer que circulen corrientes por la cara polar. Estas pérdidas están incluidas en la pérdida de núcleo.

Desafortunadamente, hay otras pérdidas en el núcleo que pueden diferir grandemente incluso en máquinas idénticas y que no se prestan a cálculos. Estas pérdidas son:

- Pérdida debida al limado de ranuras. Cuando se han ensamblado las laminaciones, se encontrará en algunos casos que las ranuras son ásperas y deben limarse para evitar cortar el aislamiento de bobina. Esto introduce rebabas en las laminaciones y tiende a poner en cortocircuito la resistencia interlaminar.

- Las pérdidas en el cepo (o manguito) sólido, placas de extremo de núcleo y soportes de bobina de flujos de fuga pueden ser considerables.
- Las pérdidas debidas a distribución no uniforme de flujo en el núcleo de rotor son difíciles de anticipar. Al calcular la densidad de núcleo, se acostumbra suponer distribución uniforme sobre la sección del núcleo. Sin embargo, el flujo toma la trayectoria de menor resistencia y se concentra tras los dientes hasta que la saturación la obliga a pasar en las trayectorias más largas y menos usadas que se encuentran abajo. Como resultado de la concentración, la pérdida de núcleo, que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la densidad, es mayor que lo calculado.

Por lo tanto, no es posible predeterminar la pérdida total del núcleo mediante el uso de fórmulas fundamentales. En consecuencia, los cálculos de pérdida de núcleo para nuevos diseños se basan por lo general en los resultados de pruebas en máquinas similares construidas bajo las mismas condiciones. Dichos resultados de prueba se grafican en la figura 55 para máquinas que utilizan laminaciones ordinarias de 0.017 in de grueso y una cantidad limitada de limaduras. No incluyen las pérdidas de cara polar, que aumentarían los valores alrededor de 30%.

11.7. Pérdida por fricción de carbones. Esta pérdida varía con la condición de la superficie del conmutador y el grado de cepillera de carbón utilizada. Una máquina típica tiene una pérdida de alrededor de $8W/(in^2 \text{ de superficie de contacto de carbón})$ (1000 ft/min) de velocidad periférica cuando se usa una presión normal de carbón de $2\frac{1}{2} \text{ lb/in}^2$.

Fricción de carbón = (8) (área de contacto) (velocidad periférica/1000) (8-32)

11.8. Fricción y resistencia al viento. La mayor parte de las máquinas de cd grandes usan cojinetes de metal babbitt y muchas máquinas pequeñas utilizan cojinetes de bolas o rodamientos, aun cuando ambos tipos de cojinetes se pueden usar en máquinas de cualquier tamaño. Las pérdidas de fricción de cojinetes dependen de la velocidad, la carga del cojinete y la lubricación. Las pérdidas por resistencia al viento dependen de la construcción del rotor, su velocidad periférica y las restricciones de la máquina al movimiento del aire. Las dos pérdidas se concentran en la mayor parte de los cálculos debido a que no es práctico separarlas durante las pruebas de las máquinas.

La figura 8-56 muestra valores típicos de pérdidas por fricción y resistencia al viento para varios diámetros de rotor referidos a velocidades de rotor.

11.9. Eficiencia. La eficiencia de un generador es la razón entre la salida y su entrada. La unidad motriz primaria debe suministrar la salida y, además, la suma de las pérdidas enumeradas en los párrafos del 67 al 74. ésta es la entrada.

12. CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR

12.1. La regulación del voltaje de un generador de cd. Esta regulación 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, pero se puede elevar debido a los efectos de campo en serie o a la acción de corrientes circulantes de comunicación a operación a muy bajo voltaje.

Para un generador de cd, la ecuación de voltaje terminal es

$$TV = E - IR (K (t) (r/min) - IR) \quad (8-34)$$

En donde E es la Fem. Inducida, IR es la caída de circuito de armadura, K es una constante que depende del diseño de la máquina y t es el flujo total de polo principal del generador.

Las curvas de regulación se calculan fácilmente mediante el uso de las curvas de saturación sin carga y plena carga y que se muestran en la figura 57. El efecto del método de excitación se encuentra si se usa la línea del campo e IR de reóstato para máquinas autoexcitadas y por línea de ampere-vueltas constantes para excitación separada.

12.2. El generador compensado y separadamente excitado. Una máquina de este tipo, que es devanado en paralelo o en derivación, tendrá una curva característica de voltaje-carga que se aproximará a una línea recta; cae a plena carga en una cantidad igual al porcentaje de caída IR. Hay poca o ninguna pérdida de flujo debida a la reacción de armadura o al desplazamiento de carbones.

A voltajes de 10% o menos de los nominales, la intensidad del campo principal es tan débil que las corrientes circulantes en las bobinas, puestas en cortocircuito por los carbones en conmutación, pueden ocasionar un aumento en el flujo de polo principal con carga que produzca una curva característica ascendente. Estas bobinas de armadura enlazan los polos principales y sus ampere-vueltas producen flujo de eje directo. Una curva característica ascendente del voltaje puede ser indeseable, en especial si el generador alimenta un motor de cd cuya velocidad aumenta con la carga, ya que esto ocasiona inestabilidad.

12.3. El generador de cd no compensado y separadamente excitado. Los generadores de esta clase, devanados en paralelo, tienen una pérdida de flujo no lineal debida a la reacción de armadura a medida que aumenta la corriente de carga. De la ecuación (8-34) puede verse que esto ocasiona una curva característica que cae con rapidez siempre creciente al aumentar la carga, produciéndose una curva que es cóncava hacia abajo.

12.4. El generador de cd no compensado y autoexcitado. En estos generadores, devanados en paralelo, se reduce la excitación del campo en paralelo a medida que cae el voltaje terminal. Esto resulta en una reducción de los ampere-vueltas de campo principal y una pérdida de flujo aún mayor, que a su vez ocasiona una caída que puede ser tan fuerte que, arriba de una cierta corriente de carga pico, el voltaje terminal no será bastante alto para proporcionar suficiente corriente de campo para mantener el voltaje y corriente de carga y el voltaje sufrirá un desplome, como se muestra en d de la figura 58.

12.5. Inestabilidad de generadores autoexcitados. Un generador de cd autoexcitado es inestable si la línea de reóstato no hace una intersección definida con la curva de saturación de carga (véase Fig. 57). La corriente de campo paralelo es fijada por el voltaje terminal, y la resistencia está en el circuito de campo paralelo. Existirá inestabilidad si la pendiente de la línea del reóstato es casi igual o mayor que la pendiente de una línea tangente al punto de operación sobre la curva de saturación. En la figura 58, el punto *b* es una condición estable de operación pero el punto *c* no lo es, porque una disminución en el voltaje disminuye los ampere-vueltas del campo de derivación y esto produce una mayor disminución en el voltaje.

Si la resistencia de campo del circuito de campo se fijara en *d*, el generador autoexcitado nunca acumularía más del voltaje residual. Otra causa por la que podría haber una falla puede ser la conexión del campo paralelo. Si el flujo de corriente debido al voltaje residual es tal que tiende a matar el flujo que produce el voltaje residual, no ocurre acumulación.

12.6. Generadores de cd de excitación mixta (compound). Los generadores descritos anteriormente pueden conectarse en compound si se agregan campos en serie excitados por la corriente de carga. Sin embargo, la intensidad de campo resultante de estos campos es lineal con la carga y la forma de la curva de regulación de voltaje no cambia, sino que sólo gira hacia arriba o hacia abajo con el punto de carga cero como pivote.

12.7. Generadores en serie. La curva 1 de la figura 59 muestra la relación entre voltaje y corriente si no hay resistencia o reacción de armadura. En realidad ésta es la curva sin carga de la máquina, obtenida por excitación separada del campo serie. La curva 2 muestra la relación real entre la corriente de carga y el voltaje terminal. La caída total de voltaje está formada por una parte causada por la disminución de flujo por reacción

de armadura y una parte causada por la caída IR de los campos serie, de carbones y armadura.

12.8. Constantes de tiempo de campo. El retardo más importante en el cambio del voltaje de salida por un cambio de excitación es ocasionado por la inductancia de los campos principales. La constante de tiempo del campo paralelo es la razón entre su inductancia en henrys y sus resistencia en ohms, y esta razón representa el tiempo en segundos requerido para que se presente el 63% del cambio de corriente de campo cuando el voltaje de excitación cambia abruptamente. En el caso del generador de 2500 Kw. Cuya armadura fue diseñada en el párrafo 6.9 y cuyos campos se desarrollaron en el párrafo 9.2, una inductancia media de campo principal sobre la escala de voltaje de 0 a nominal es 6.20 H. La resistencia de campo principal es 2.21 Ω . Por lo tanto, la constante de tiempo de campo es 2.8 s.

La inductancia L de una bobina es el cambio con incremento de los eslabones de flujo por el cambio que incrementa en la corriente de flujo multiplicada por 10^{-8} .

Esta es proporcional a la pendiente de la curva de saturación y es constante sobre la línea del entrehierro. Por lo tanto, es una variable decreciente después que la curva sale de la línea de entrehierro (véase Fig. 46). La inductancia total, a medida que el voltaje aumenta desde cero, no es tan alta como la de la porción del entrehierro o tan baja como el punto de voltaje nominal. Un punto medio común es la pendiente de una línea recta dibujada desde voltaje cero y que pasa por el punto de plena carga a voltaje nominal. Para el generador de 2500 Kw., El flujo total en este punto es 112.5×10^6 líneas. Con un flujo de fuga de 12%, cada bobina tiene un flujo de 12.6×10^6 líneas (véase tabla 8-2). Como se indica en el párrafo 60, cada bobina tiene 192 vueltas y hay 10 bobinas en serie. La corriente de campo es 39.1 A.

8.35

Constante de tiempo = $L/R = 6.2/2.21 = 2.8$ s 8.36

Este valor es típico para máquinas grandes. Los generadores más pequeños tienen menos cobre en sus campos y menores constantes de tiempo. En los casos en donde los sistemas de impulsión deben tener ajustes de voltaje muy rápidos, es común producir grandes voltajes elevadores en el campo para vencer el retraso inductivo. Estos cambios repentinos de excitación pueden ser de 4 a 10 veces la caída IR del campo, lo que reduce de manera efectiva la constante de tiempo a un cuarto o un décimo de su valor normal.

12.9. Constantes de tiempo de circuito de armadura. Los devanados de compensación reducen de manera efectiva las inductancias del circuito de armadura. El generador de 2500 Kw. Desarrollado en esta sección tiene una inductancia de circuito de armadura de 0.0001929 H y una resistencia de circuito de 0.00398 Ω para una constante de tiempo de 0.048 s. Este valor es típico para máquinas de cd grandes. Las unidades más pequeñas y no compensadas tienen constantes de tiempo más largas.

13. PRUEBA

13.1. Pruebas en fábrica. Estas pruebas dependen del tamaño, aplicación y diseño del generador de cd. La norma C50.4 del American National Standards Institute (ANSI) para máquinas de cd incluye listas de pruebas recomendadas para generadores y motores de cd. El Código de Prueba del IEEE para máquinas de cd comprende los métodos recomendados que se usan para estas pruebas.

14. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE GENERADORES

14.1. Generalidades. A pesar de su robusta construcción, una máquina de cd es un aparato delicado. Las pruebas de fábrica en unidades grandes pueden costar miles de dólares y deben ser efectuadas cuidadosamente para ajustar el generador y para que se obtengan las mejores características y conmutación posibles. Debido a necesidades de embarque, el generador puede tener que desarmarse y embarcarse en varias partes. Si el

ensamble final no se lleva a cabo correctamente, no sólo se han desperdiciado las pruebas de fábrica sino que también la máquina puede resultar dañada.

Debe estudiarse cuidadosamente el manual de instrucciones del fabricante.

14.2. Antes de la instalación. A su llegada, el generador debe ser inspeccionado para que no tenga averías y asegurarse que se encuentre seco; si está húmedo, consúltese al fabricante. El secado con calor debe realizarse sólo con elevación lenta de la temperatura del generador a 100°C, de modo que la humedad pueda escapar sin formar burbujas de gas dentro del aislamiento.

Si el generador está seco y limpio, los devanados deben medirse con un megger para verificar la resistencia del aislamiento a tierra. Si se encuentra cualquier lectura menor que 1 M!, consúltese al fabricante.

14.3. Alineamiento. Una vez que las máquinas se hayan instalado y puesto la lechada en cimentaciones, todos los acoplamientos deben abrirse y realizarse una inspección final de los alineamientos de todos los ejes. Ya sea que se utilicen acoplamientos sólidos o flexibles, el alineamiento debe ser tan preciso como sea posible. La diferencia entre las aberturas inferior y superior no deben rebasar 0.002 in para un diámetro de brida de 12 in, y la abertura grande debe estar en la parte alta. Cualquiera que sea la medida del acoplamiento, la diferencia no debe rebasar 0.004 in. Las diferencias en el costado no deben ser mayor que 0.001 in. Los ejes deben hacerse girar 180° y volverse a comprobar.

El bastidor debe ponerse en el centro magnético del núcleo. Esta posición puede ubicarse al poner la armadura en rotación y forzándola a oscilar longitudinalmente, hasta el tope máximo del cojinete, empujando en el extremo del eje. Mientras el rotor se mueve por inercia y oscila libremente, hágase excitar el campo principal. El estator puede entonces desplazarse de modo que la posición del rotor con la excitación coincida con el centro de juego final del cojinete.

Los espacios de aire entre el rotor y los polos deben ser uniformes. Un límite típico de variación es 0.010 in. Los carbones deben desplazarse correctamente en la superficie del conmutador en ambos extremos del juego final del cojinete.

14.4. Comprobaciones previas a la operación. La posición circunferencial de los carbones en el conmutador es importante para la conmutación y también para obtener las características de voltaje que se fijan en fábrica. Los carbones deben estar en la posición de prueba desde fábrica. Las pestañas o rebordes de los carbones deben estar alineados y no deben tener oblicuidad. La separación entre los brazos adyacentes de los carbones debe ser idéntica a no más de 0.032 in. Los carbones deben moverse libremente en sus portacarbones y deben tener una presión contra el conmutador de 2 a 3 lb/in² con base en la sección transversal del carbón. Las caras de los carbones deben adaptarse en forma precisa a la curvatura de la superficie del conmutador.

La polaridad de los campos principales debe comprobarse siguiendo el alambre alrededor del bastidor, o mediante la excitación ligera de los campos y el uso de una brújula alrededor del bastidor tras los polos.

El sistema de lubricación para los cojinetes debe comprobarse y los anillos de aceite deben probarse para ver que se muevan libremente. Toda la máquina, en particular sus espacios de aire, deben inspeccionarse para ver que no tengan materias extrañas.

14.5. Comprobaciones de operación. Escúchese cualquier ruido anormal cuando la unidad aumente la velocidad. Las temperaturas de los cojinetes deben nivelarse en valores aceptables en unas pocas horas de operación.

El voltaje debe elevarse lentamente sin carga y observarse la conmutación. Si todo es satisfactorio, el voltaje debe elevarse a 110% del valor nominal y luego reducirse.

El generador podrá entonces cargarse gradualmente mientras se observa la conmutación, hasta que se alcance el nivel de corriente nominal. Si la conmutación permanece en condiciones satisfactorias hasta que se alcancen temperaturas estables, el generador está listo para operar.

14.6. Generadores en paralelo devanados en derivación. A y B de la figura 60 son dos generadores semejantes que alimentan las mismas barras colectoras C y D. Si A tiende a tomar más de su parte de la carga total, su voltaje baja y automáticamente se pasa más carga a B. También, si el impulsor primario de uno de los generadores desacelera y deja de funcionar, la Fem. De la máquina bajará hasta que el otro generador empiece a accionarlo como un motor. Este proceso continúa hasta que el impulsor primario vuelve otra vez a funcionar.

En la figura 8-61 se ilustran las características externas de las dos máquinas. Al voltaje E, las corrientes de los generadores son I_a e I_b y la corriente de línea es $I_a + I_b$. Para hacer que la máquina A tome más de la carga, su excitación debe aumentarse para elevar su curva característica. Si un generador de 1000 Kw. Y una máquina de 500 Kw. Tienen las mismas curvas de regulación, las máquinas se dividirán la carga según sus capacidades respectivas, como se ilustra en la figura 8-62.

14.7. Generadores de devanado compuesto (o compound) en paralelo. A y B de la figura 8-63 son dos máquinas de devanado compuesto. Si A tiende a tomar más de su parte de la carga, su voltaje se eleva y tomará aún más de la carga y por lo tanto la operación es inestable. Si esto continúa hasta que A toma toda la carga y el voltaje de B cae hasta el punto en que A invierte la corriente de B, B será accionado como motor. Con la corriente invertida en el campo serie de B, éste se convierte en motor diferencialmente compuesto y la serie debilita el flujo para acelerar el motor. Esto puede avanzar a un punto en el que la unidad puede resultar averiada mecánica o eléctricamente.

Para evitar esto, de e a f se conecta una barra colectora de sección grande y resistencia despreciable (Fig. 8-63); los puntos e y f están, entonces, prácticamente al mismo potencial y, por lo tanto, la corriente de cada bobina en serie es independiente de la corriente de su generador particular, es inversamente proporcional a la resistencia de las bobinas y está siempre en la misma dirección.

Cuando un solo generador compuesto tiene demasiada composición, una derivación en paralelo con las bobinas de campo en serie reducirá la corriente en estas bobinas y así reducirá la composición. Cuando generadores compuestos (compound) operen en paralelo al utilizar una barra igualadora, la corriente en las bobinas de campo serie depende sólo de la resistencia de las bobinas y una derivación conectada en paralelo con una de ellas está, en realidad, en paralelo con todas y se reduce la composición relativa entre las máquinas. Para reducir esta composición en una sola máquina, es necesario conectar una resistencia en serie con las bobinas; esto puede requerir una resistencia grande para manejar la gran corriente de carga que debe llevar.

14.8. Mantenimiento. Excepto para el conmutador y sus carbones, la conservación de máquinas de cd difiere poco del de otras máquinas eléctricas giratorias. Debe proporcionarse lubricación adecuada a los cojinetes, y la máquina debe conservarse limpia y seca. Además, los carbones deben inspeccionarse periódicamente en cuanto a conmutación, capacidad de deslizamiento, libertad de movimiento en los portacarbones, presión y longitud.

En vista que los cuellos de conmutador no están aislados y reciben voltaje pleno, el polvo conductor proveniente del desgaste de los carbones o del aire de ventilación puede ocasionar corrientes de conducción superficial entre los elevadores y tierra sobre superficies aisladas. Para evitar esto, el generador de cd debe ser limpiado y soplado con aire seco y limpio a intervalos regulares; no deben usarse presiones mayores que 25 lb/in² debido al riesgo de levantar los bordes de la cinta de aislar. La efectividad del programa de limpieza debe verificarse ocasionalmente mediante lecturas con megger.

14.9. Conmutación Deficiente. El chisporroteo y las quemaduras de barras se deben por lo general a una o más de las siguientes causas:

- Los carbones no están en la posición correcta.
- Separación incorrecta de los carbones. Esto puede comprobarse al marcar una cinta de máquina sumadora alrededor del conmutador.
- Mica que sobresale del borde de barra. La mica entre barras debe cortarse al sesgo como 0.063 in debajo de la superficie de conmutación, pero en ocasiones se dejan por descuido astillas de mica a lo largo de la barra.
- Conmutador áspero o quemado. El conmutador debe ser esmerilado según el manual de instrucciones del fabricante.
- Conmutador ranurado. Esto puede evitarse si se alternan debidamente los juegos de carbones, de modo que los espacios entre los carbones de un brazo queden cubiertos por carbones de la misma polaridad de otros brazos.
- Contacto deficiente de carbones debido a ajuste incorrecto de los carbones a la superficie del conmutador. Para asentar los carbones, pásese papel de lija entre el conmutador y la cara del carbón; no debe usarse lija esmeril porque su abrasivo es conductor.
- Carbones gastados y sustituidos por otros de tamaño o grado diferente.
- Carbones que se pegan, que no se mueven libremente en sus portacarbones de modo que puedan seguir las irregularidades del conmutador.
- Crepitación de los carbones. Por lo general esto se debe a la operación con densidades de corriente debajo de 35 A/in² y debe ser corregida levantando los carbones para elevar la densidad o usando un grado especial de carbones.
- Vibración. Esto puede deberse a alineación defectuosa, cimentación inadecuada o balanceo deficiente del rotor.
- Vueltas en cortocircuito en los campos de conmutación o de compensación; pueden ser obvias en una inspección pero por lo general deben encontrarse al pasar una corriente alterna por ella para comparar caídas de voltaje.
- Uniones abiertas o de muy alta resistencia entre el cuello del conmutador y los hilos de bobina. En este caso, por lo general se quema la barra y la junta mala.
- Una bobina abierta de armadura. Un conductor de bobina roto produce un efecto similar al de las uniones defectuosas descritas en l. Para operación de emergencia, la bobina abierta puede ser abierta en ambos extremos, aislada del circuito y puesto un cable en las terminales de los dos cuellos afectados. Como es probable que se produzcan algunas chispas, la operación debe ser limitada.
- Bobinas de campo principal en cortocircuito. Con los resultantes flujos desbalanceados de entrehierro bajo los polos, deben esperarse grandes corrientes circulantes incluso con buenas conexiones cruzadas de armadura. La bobina causante puede encontrarse al comparar caídas de voltaje en las bobinas individuales.
- Bobina de campo principal invertida. Éste es un caso extremo de n.
- Sobrecarga.

15. GENERADORES ESPECIALES

15.1. Generalidades. La adaptabilidad del generador de cd para usos específicos ha llevado al desarrollo de muchos generadores especiales. En el pasado estas máquinas contribuyeron de manera importante al progreso industrial. Sin embargo, la mayor parte de estas aplicaciones especiales han desaparecido o se realizan con otros dispositivos como son los rectificadores controlados de silicio (SCR) o el control programado de corriente de campo al generador de cd principal.

15.2. Convertidores sincrónicos. De todos los generadores especiales, éste fue uno de los primeros y más ampliamente usados. Fue la fuente principal de corriente directa para tranvías y líneas interurbanas; fue un aparato muy ingenioso que combinaba en una sola armadura y devanado, un motor de ca que tomaba su corriente de las líneas a través de anillos deslizantes en la parte posterior, y un generador de cd que proporcionaba corriente directa de un conmutador en el extremo delantero. Debido a que la circulación de

corrientes estaba en oposición, el devanado de rotor resultante podría ser de sección transversal pequeña. Un solo estator producía el flujo para ambas funciones. Con la decadencia de los sistemas ferroviarios urbanos, desapareció el convertidor sincrónico.

15.3. Reguladores giratorios. Las máquinas de cd tenían marcas como Rototrol, Regulex y Amplidyne; también éstas han sido sustituidas por dispositivos de estado sólido. Además de tener campos para inteligencia de retroalimentación, la respuesta se mejoró mediante el uso de campos en derivación autoexcitados y sintonizados a la línea de entrehierro o por medio de magnetización cruzada desde reacción de armadura.

15.4. Aparatos de tres hilos. Debido a que ya no están en uso los circuitos de cd de tres hilos, los juegos de balanceo y los generadores de tres hilos son reliquias de laboratorios escolares o de museos.

15.5. Generadores de cd homopolares o acíclicos. El principio de la máquina monopolar aún fascina a ingenieros electricistas y diversos laboratorios de investigación y desarrollo continúan estudiando nuevos acomodos de sus partes básicas. Fundamentalmente, consta de un solo conductor que se mueve en un flujo uniforme en una dirección con un colector en cada extremo del conductor. La salida es una corriente de cd constante y pura, libre de rizados y sin conmutación. Corrientes de 270 000 A a 8 V fueron producidas por la unidad comercial como la que aparece en la figura 8-64.

Trabajos recientes se han encaminado principalmente al uso de metales líquidos para transportar las corrientes elevadas desde los colectores giratorios y para obtener voltajes más altos al conectar unidades en serie. Se ha obtenido un poco de éxito, pero la restricción del sodio y potasio en la zona del colector ha resultado difícil.

16. Bibliografía

Manual de la ingeniería eléctrica, decimotercera edición, Tomo II, Donald G. Fink/H. Wayne Beaty. , Mc Graw Hill.