EVALUACIÓN DINAMICA DE MOTORES ASINCRONOS TRIFASICOS

1. INTRODUCCIÓN

Cuando nos referimos a máquinas rotativas trifásicas, estamos incluyendo a los motores tipo jaula de ardilla (de una y doble jaula) y rotor bobinado. Para comprobar la validez de nuestro software, se han realizado las simulaciones correspondientes con un motor Marca DELCROSA, así mismo se han realizado simulaciones con motores de diversas marcas y tamaños. Hemos tenido en cuenta la categorización de los motores Jaula de ardilla según las normas IEC 34 -12 y NEMA., así mismo se ha contemplado la constitución mecánica y eléctrica según IEC 34 – 1 – 5 - 7 y 8. Creemos que esta herramienta ayudará a los estudiantes y profesionales vinculados con el área.

2. DESLIZAMIENTO, VELOCIDAD Y FRECUENCIA

Deslizamiento(s).-En una característica de las maquinas rotantes asíncronas y está definida por las ecuaciones siguientes:

$$S = \left(\frac{(n - n_r)}{n}\right) 100$$

$$S = \left(\frac{(w_s - w_r)}{w_s}\right) 100$$

$$n = 120\frac{F}{P}$$

$$n_r = n(1 - s)$$

Donde:

F : frecuencia síncrona (estator) en HZ.
P : número de polos.
n_r : velocidad rotacional del rotor en RPM.
N : velocidad rotacional síncrona RPM.
w_s : velocidad angular síncrona en rad/seg.
W_r : velocidad angular del rotor en rad/seg.

3. MODELO DE LAS MÁQUINAS ASINCRONAS TRIFASICAS

Si se desea pronosticar el comportamiento de un motor de inducción trifásico resulta imprescindible definir el modelo ADECUADO de la máquina a partir de las siguientes leyes:

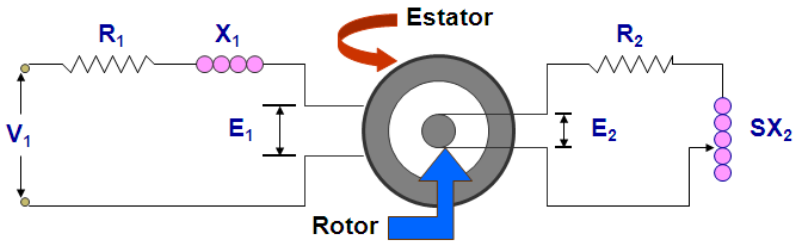
- Ley de Amper.
- Ley Faraday.
- Ley Lenz y Lorenz.
- Ley de Biot y Savart.
- Leyes de Kirchoff (LKI y LKV).

Este modelo debe permitir la evaluación dinámica de los parámetros del motor en funcionamiento. Para el estudio del motor jaula de ardilla utilizamos un modelo monofásico muy análogo al del transformador del que deducimos el circuito equivalente exacto que vamos a utilizar es:

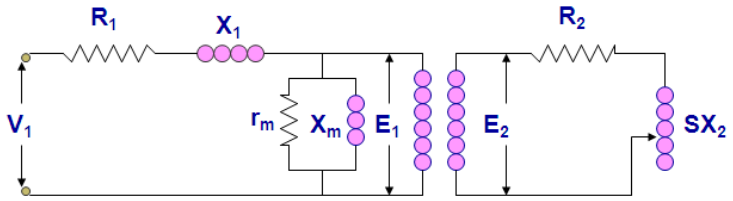
4. CIRCUITOS EQUIVALENTES DE LAS MAQUINAS ROTATIVAS DE INDUCCION

NOTA: El hecho de utilizar un modelo aproximado significa correr el núcleo a los bornes,

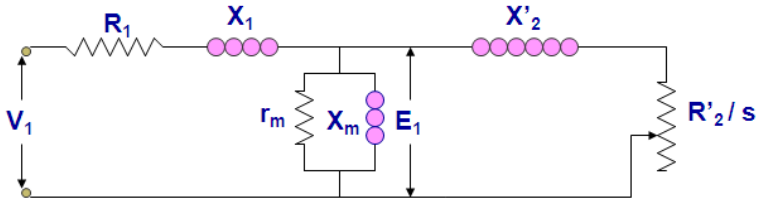
provocando un error del 2 al 5 % dependiendo del tamaño de las maquinas, para evitar este error nuestra metodología utiliza el modelo exacto.



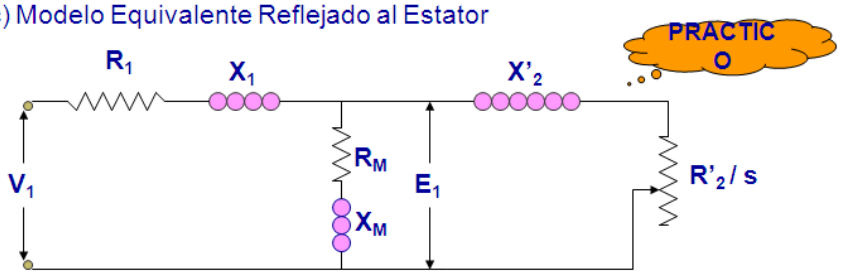
(a) Modelo Fisico



(b) Modelo Equivalente



c) Modelo Equivalente Reflejado al Estator



(d) Modelo Exacto

5. PÉRDIDAS PRODUCIDAS DURANTE SU DESEMPEÑO

5.1 **PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO**.- Se presentan en el circuito magnético de la máquina como consecuencia de la utilización de la corriente alterna, para cuantificar la energía absorbida por el núcleo es que lo dividimos en:

Pérdidas por corrientes de Eddy (PE).- Llamada también corrientes parásitas, constituye la característica de operación de un circuito magnético excitado con C.A.

$$PE = K_e F^2 B_m{}^2 \left(\frac{\text{Watts}}{\text{Kgr}}\right)$$

Donde:

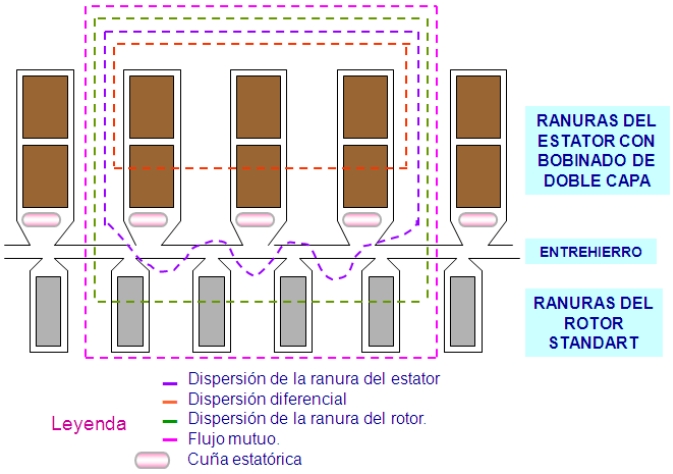
K_e : Constante que depende de la conductividad del material y de su espesor.
F : Frecuencia en Hz.
B_m : Densidad máxima de flujo en el entrehierro (Tesla).

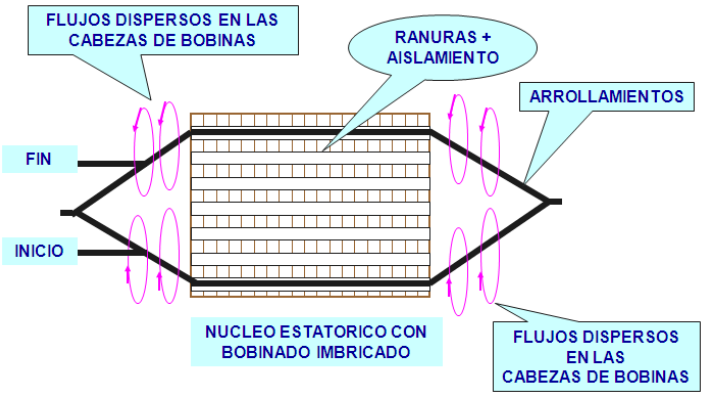
Pérdidas por histéresis (Ph).- La fuerza magnetomotriz utilizando corriente alterna presenta una curva cerrada y simétrica B vs H, y el área interna (dentro de la curva cerrada) es proporcional a la pérdida de energía (en forma de calor) por ciclo.

$$Ph = K_h F B_m{}^{\alpha} \ (\text{Watts/Kgr})$$

Donde:
K_h : es una constante de proporcionalidad que depende de la calidad de acero.
α : es un exponente que según los fabricantes varía entre 1.5 - 2.5.

Trayectorias de flujos magnéticos en los motores





5.2 **PÉRDIDAS EN EL BOBINADO ESTATÓRICO.-** Son las pérdidas (efecto Joule) que se producen en los arrollamientos (alambre esmaltado) del estator.

$$P_{estator} = I_1{}^2 R_1$$

5.3 **PÉRDIDAS EN EL BOBINADO ROTÓRICO (O JAULA DE ARDILLA).-** son las pérdidas que se producen en los arrollamientos del bobinado rotórico o jaula de ardilla del rotor.

$$P_{rotor} = I_2'^2 R_2'$$

5.4 **PÉRDIDAS SUPLEMENTARIAS.-** Está compuesto por las diversas fricciones producidas dentro de la máquina (rodamientos) y el trabajo producido por el ventilador externo y aletas del rotor encargados de la ventilación del sistema.

5.5 **POTENCIA ROTACIONAL (PROTAC).** Con este ensayo se obtiene las pérdidas totales producidas por el sistema de ventilación, además de las fricciones respectivas de las máquinas rotantes.

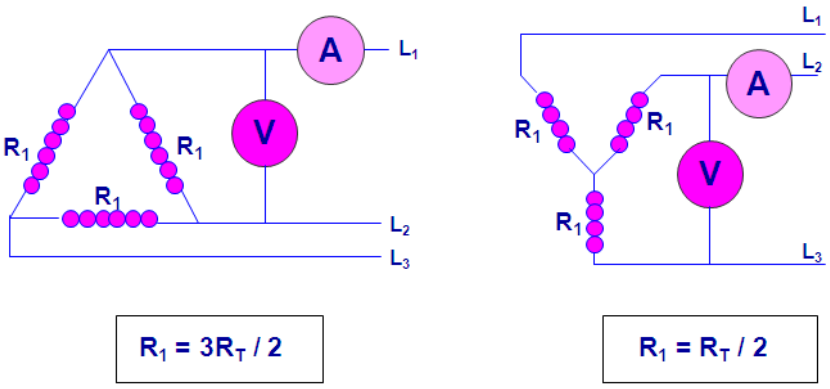
$$P_{rotac} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \emptyset - 3 I_1^2 R_1$$

Donde:

I_1 : corriente de fase en amperios.
V_L : tensión de línea en voltios.
I_L : corriente de línea en amperios.
cos$\emptyset$: factor de potencia sin carga

6. ENSAYOS REALIZADOS

6.1 MEDIDA DE LA RESISTENCIA DEL ESTATOR.
Método del voltio a perimétrico.
Método del puente wheastone.



$$R_{1\,DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \qquad \left(\frac{\text{Ohmios}}{\text{fase}}\right)$$

$$R_1 = R_{1DC}(1 + \alpha(T - T_0)) \qquad \left(\frac{\text{Ohmios}}{\text{fase}}\right)$$

$$R_{1AC}(T) = KR_1 \qquad \left(\frac{\text{Ohmios}}{\text{fase}}\right)$$

Donde:

K : constante del efecto skin.
R_{1DC} : resistencia a temperatura ambiente (T_0)
R_1 : resistencia a temperatura de trabajo (T)

R_{1AC} : resistencia estator en AC.
α : coeficiente de temperatura y depende del material siendo su valor
α (cobre) = 0.00393 $^0C^{-1}$ y α(aluminio)=0.035 $^0C^{-1}$

$$x = 0.063598\sqrt{\frac{uF}{R_1}}$$

Siendo u=1 (permeabilidad para materiales no magnéticos) y F=60Hz

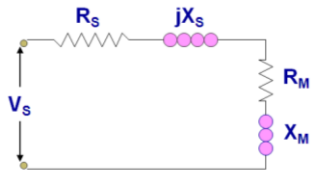
Tabla No 1.- Efecto Skin (X vs K)

X	K	X	K	X	K	X	K
0.0	1.0000	1.0	1.0052	2.0	1.0782	3.0	1.3181
0.1	1.0000	1.1	1.0076	2.1	1.0938	3.1	1.3510
0.2	1.0001	1.2	1.0107	2.2	1.1113	3.2	1.3850
0.3	1.0004	1.3	1.0147	2.3	1.1307	3.3	1.4199
0.4	1.0013	1.4	1.0197	2.4	1.1521	3.4	1.4557
0.5	1.0032	1.5	1.0258	2.5	1.1754	3.5	1.4920
0.6	1.0006	1.6	1.0332	2.6	1.2006	3.6	1.5288
0.7	1.0012	1.7	1.0421	2.7	1.2275	3.7	1.5658
0.8	1.0021	1.8	1.0524	2.8	1.2562	3.8	1.6031
0.9	1.0034	1.9	1.0644	2.9	1.2864	3.9	1.6405

6.2 PRUEBA DE VACIO.

Se opera el motor sin carga en el eje a tensión y frecuencia nominales. Se toman las lecturas de tensión, corriente y potencia de entrada así como el valor de la velocidad rotacional. La potencia leída corresponden a las pérdidas en: El cobre del bobinado estatórico, núcleo y pérdidas rotacionales dentro de la máquina. Luego:

$$P_{TOTALES} = P_{COBRE} + P_{NUCLEO} + P_{ROTACIONALES}$$



En esta prueba es muy importante constatar que las curvas de excitación Vrst (voltios) vs I(Amperios) y Bmax (Gauss) vs H (Amper-vuelta/metro) sean iguales, y para facilitar su cálculo se presentan las ecuaciones siguientes:

$$B_m = \frac{V_L 10^{-8}}{4.44\ F\ A\ N}\,(\text{gauss})$$

$$H = \frac{N\sqrt{3}I_f}{L_m}\,(\text{gauss})$$

Donde:

L_m : Longitud media al paquete magnético en (m).
N : Número de vueltas del bobinado estatórico.
L : Longitud del paquete magnético.

C : Altura de la corona en m.
F : Frecuencia del sistema en hz.
V_L : Tensión delinea-línea en voltios.
A = LC = área transv.del paquete estatorico.
$I_L = \sqrt{3} I_f$: Cuando la conexión es triangulo y el dato es corriente de fase.

Objetivos:

- Levantar la curva de vacío(ubicar la zona de saturación) a tensión y frecuencia nominal.
- Evaluar la impedancia del núcleo.
- Constatar que la fuerza magnetomotriz total sea equilibrada, esto es que las corriente de línea sean iguales.
- Medir las pérdidas en el núcleo (Corrientes de Foucoult y Edy)

Tabla N° 2.- Ensayo de vacio

V Linea (Voltios)	I Linea (Amperios)	P Nucleo (Vatios)	Q Nucleo (VARS)	S Aparente (Volt-Amp)	Velocidad (RPM)	COS Ø

Las impedancias del rotor y carga muy grandes (Z'2 + RL $\longrightarrow$ ∞), luego podemos plantear para esta prueba la siguiente formulación:

$$Z_0 = \frac{Z_0}{I_0}$$

$$R_0 = \frac{P_0}{{I_0}^2} = R_1 + R_M$$

$$X_0 = \sqrt{{Z_0}^2 - {R_0}^2} = R_1 + R_M$$

Donde:

Z_0: Impedancia equivalente por fase (Ω).
V_0: tensión de fase en voltios.
R_0: Impedancia equivalente por fase (Ω).
P_O: Potencia monofásica en vatios.
R_M: Resistencia del núcleo (Ω).
X_O: Reactancia equivalente (Ω).
X_M: Reactancia magnetizante del núcleo(Ω).
I_O :Corriente de vacío en Amp.

6.3 PRUEBA EN CORTO CIRCUITO(rotor bloqueado)

Se realiza con el rotor mecánicamente parado alimentándose con una tensión reducida y a frecuencia nominal, para poder hacer circular por los devanados del estator la corriente nominal. Se aconseja tomar las lecturas rápidamente observando la temperatura del cobre antes y después del ensayo, a fin de evitar errores por cambio de temperatura. Las reactancias estatóricas y rotóricas para un motor tipo jaula de ardilla dependen de la categorización según NEMA MG1 incluido en EMRAT). Esto nos permite plantear el siguiente modelo y formulación:

Objetivo

- Evaluar Z_2' .
- Evaluar la impedancia Zr, Zs y Zt (Deben ser iguales).
- Controlar que las corrientes de las tres fases sean iguales a la corriente nominal de la placa (medir que la frecuencia sea la nominal).
- Medir las pérdidas en el cobre (Efecto Joule del motor).

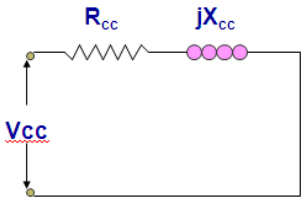


Tabla N° 3.- Ensayo de corto circuito

V Linea (Voltios)			I Linea (Amp)			P Activa	Q Reactiva	S Aparente	COS Ø
RS	RT	ST	R	S	T	(Vatios)	(VARS)	(Volt-Amp)	

$$R_{CC)} = \frac{P_{CC}}{3xI_{CC}^2} = R_{1AC(T)} + R'_2 \qquad \Omega/fase$$

$$Z_{CC)} = \frac{V_{CC}}{\sqrt{3}\,xI_{CC}} \qquad \Omega/fase$$

$$X_2' = S\left(\frac{X_{CC}}{2}\right) \qquad \Omega/fase$$

$$X_{CC} = \sqrt{Z_{CC}^2 + R_{CC}^2} = X_1 + X_2' \qquad \Omega/fase$$

$$R_2' = R_{CC} - R_{1AC} \qquad \Omega/fase$$

Para evaluar X_1 y X_2' recurrir a las reactancias estatóricas y rotóricas

Donde:

R_{cc} : Resistencia a rotor bloqueado (Ω).
P_{cc} : Es la potencia activa (Vatios)
I_{cc} : Corriente nominal de línea (A).
V_{cc} : Es la tensión de linea (Voltios).
X_{cc} : Reactancia a rotor bloqueado (Ω).
x_2' : Reactancia inductiva del rotor (Ω).

En el desarrollo del software hemos tenido en cuenta la variabilidad de la corriente, torque, potencia, FP, EF y Pútil en función del deslizamiento y hemos analizado con especial atención las zonas de: Arranque, nominal y vacío.

Según la IEE Presentan la tabla $N_0$3 referidas a las reactancias de dispersión del estator (X_s) y por (Xr) de los motores de inducción trifásicos en función de Las reactancias equivalentes de corto circuito o por rotor bloqueado (X_{cc}) y a partir de esta tabla conociéndose X_o y X_1 puede hallarse X_m.

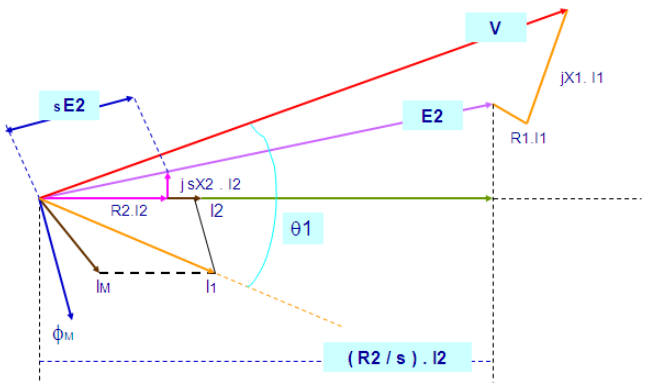
Tabla No 4 .- Reactancias estatóricas y rotóricas.

Tipo de motor	Clase NEMA A	Clase NEMA B	Clase NEMA C	Clase NEMA D	Rotor Bobinado
Xs	0.5 Xcc	0.4 Xcc	0.3 Xcc	0.5 Xcc	0.5 Xcc
Xr'	0.5 Xcc	0.6 Xcc	0.7 Xcc	0.5 Xcc	0.5 Xcc

Para una discusión mas completa de las pruebas de los motores de induccion ver IEEE TEST CODE FOR POLYPHASE INDUCTION MOTORS AND GENERATORS N° 112 A (1964) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGENIEERS 345 EAST 47 th street new york n.y. 10017.

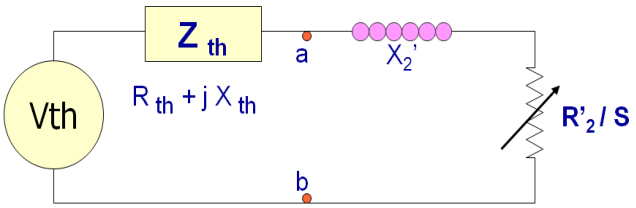
.

7 DIAGRAMA FASORIAL MONOFASICO



8 EVALUACION DEL TORQUE MAXIMO

Para evaluar el torque máximo utilizamos el teorema de la máxima transferencia de potencia aplicado al modelo exacto.



$$\frac{R_2'}{S_{max}} = \sqrt{(R_{TH}{}^2 + (X_{th} + x_2')^2)}$$

$$S_{max} = \frac{R_2'}{\sqrt{\left(R_{TH}{}^2 + (X_{th} + x_2')^2\right)}}$$

Reemplazando :

$$\mathrm{T_{MAX}} = \left(\frac{R_2'}{\mathrm{W_S}}\right)\frac{S_{max}V_{th}^2}{\left(\left(S_{max}R_{th} + R_2'\right) + {S_{max}}^2\left(\mathrm{X_{th}} + x_2'\right)^2\right)} \qquad \mathrm{N-m}$$

Para obtener el deslizamiento correspondiente al torque maximo(sb),que va ha tener el torque en su proceso del rompimiento de la inercia del sistema, este valor podemos encontrarlo derivando la ecuacion con respecto al deslizamiento,esto es:

$$\frac{d(Te)}{ds} = 0$$

$$KW = TeW_m = \frac{I_2^2 R_2^{'}(1-S)}{s} \qquad KW/fase$$

$$Te = \frac{I_2^2 R_2^{'}(1-S)}{sW_m} \qquad y \quad W_m = (1-S)W_s$$

$$Te = \frac{1}{W_m(1-S)}\left(\frac{V_1^2}{R_1 + \left(\frac{R_2^{'}}{s}\right) + jX_{eq}^2}\right)\left(\frac{R_2^{'}(1-S)}{s}\right)$$

En consecuencia tambien se puede obtener el Smax en forma analitica siendo el resultado del deslizamiento maximo:

$$S_{max} = \frac{R_2^{'}}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th}^2 + X_2^{'})^2}}$$

en la curva de torque vs velocidad podemos distinguir claramente los torques de arranque, minimo maximo,nominales y de la carga.su calculo es importante puesto que el determinar la capacidad de sobrecarga momentanea del motor. En los motores de induccion tipo jaula de ardfilla SCIM el torque maximo se obtiene aplicando el teorema de maxima transferencia para lo cual en elrotor se presenta la siguiente igualdad:

$$\mathrm{R_r^{'}} = \mathrm{S_{max}X_{CC}}$$

siendo Smax. El deslizamiento en la region donde se produce el torque maximoy se halla utilizando la sgte.formula:

$$\mathrm{S_{max}} = \frac{(\mathrm{RPM_{SINC}} - \mathrm{RPM_{Tm}})}{\mathrm{RPM_{SINC}}}$$

RPM(Tm) esla velocidad donde se produce el torque maximo. Entonces el torque maximo desarrollo por el rotor (Tmax) se puede calcular utilizando la siguiente ecuacion:

$$T_{max} = T_r\left(\frac{\left(\frac{S_{max}}{S_r} + \frac{S_r}{S_{max}^{'}}\right)}{2}\right)$$

$$S_r = \frac{RPM_{SINC} - RPM_{ROTOR}}{RPM_{SINC}}$$

Donde:

T_r: torque nominal.

Sr Deslizamiento a la velocidad nominal del rotor.

9 TORQUE ARRANQUE (T_{arr})

El efecto pelicular (skin) y la temperatura hacen que la impedancia retorica se diferente del valor que alcanza en operación normal, entonces se precisa tener niveles permisibles de torque y corriente de arranque, tales que saquen del reposo a la masa inercial sin llegar a deteriorar sus componentes tales como conductores aislados, materiales, aislantes, etc

$$T_{arr} = T_{max} \frac{2}{(\frac{S_{max}}{S_{arr}} + \frac{S_{arr}}{S_{max}})}$$

s_{arr} =1 (en el momento de arranque, el rotor se halla parado)

Habiendo realizado las pruebas de corto circuito donde podemos conocer v_{cc}, R'_2,X_{CC}, esto nos permitirá conocer R'_2 (resistencia total del rotor en ohm/fase), tal que s_{arr} = 1

$$I_{arr(nom)} = \frac{V_{CC}}{\sqrt{R'^{\,2}_{2TOT} + X_{CC}^{\,2}}}$$

Solo consideramos el circuito rotorico pues la corriente $I'_2 >>> I_\emptyset$

Finalmente la potencia de ingreso al rotor en el arranque está dado por la siguiente ecuación.

$$RPI_{nom} = (\frac{V_{CC}^2}{R_r'^{\,2}} + X_{CC}^2) R'_{2TOT}$$

10 CORRIENTE DE ARRANQUE (I_{arr})

Los numerosos ensayos realizados por los fabricantes han encontrado que la impedancia equivalentes del núcleo Zm en muchos mayor que la impedancia equivalente de la maquina (Zeq) Por esta razón y sin cometer mucho error podemos hacer el siguiente planteamiento.

$$R_{eq} = R_1 + R'_2 \ , \qquad R_{eq} = X_1 + X'_2, \quad R'_2 = a^2 R_2 \ , \qquad R_L = R'_2 \frac{(1-S)}{S}$$

$$I_\emptyset = I_P + JI_M \quad y \qquad I_\emptyset \approx \frac{V_S}{Z_S} \ \frac{amp}{fase} \qquad a = \text{relacion de transformacion}$$

Luego, podemos afirmar,que la corriente total registrada en elestator esta dada por:

$$I_1 = I_0 + I'_2 \qquad amp/fase$$

$$I'_2 = \frac{V_S}{R_{eq} + R_L + JX_{eq}} \qquad amp/fase$$

$$I'_2 = \frac{V_S}{R_{eq} + \frac{R'_2}{S} + JX_{eq}} \qquad amp/fase$$

Cuando la velocidad de la masa girante sea igual a cero $RPM_{rotor}=0$ el deslizamiento tomara el valor S=1 luego podemos encontrar la corriente de arranque de la maquina.
En la ecuacion se puede notar que la corriente de arranque no esta en funcion de la carga,pero sidependemos directamente de los parametros del motor (donde si resulta predominante las caracteristicas del rotor).

$$I'_{2arr} = \frac{V_S}{R_{eq} + R'_2 + JX_{eq}} \qquad amp/fase$$

10.1 VALORES MÁXIMOS NORMALIZADOS.

La tabla N° 5 muestra los limites maximos de la corriente conrotor bloqueado en funcion de la potencia nominal del motor.son validos para cualquier numero de polos y estan expresados en terminos de la potencia aparante absorbidos con el rotor bloqueado en relacion ala potencia nominal, KVA/KW.

$$KVA/CV = \frac{POTENCIA\ APARENTE}{POTENCIA\ NOMINAL}$$

$$KVA/CV = \frac{\sqrt{3}I_P\mathrm{V}}{P(CV)1000}$$

$$KVA/KW = \frac{\sqrt{3}I_P\mathrm{V}}{P(KW)1000}$$

TABLA N° 5.- POTENCIA APARENTE CON ROTOR BLOQUEADO (S_P / S_N) PARA MOTORES TRIFÁSICOS CONFORME LA NORMA IEC 34-12.

FAJA DE POTENCIAS NOMINALES		S_P / S_N	
CV	KW	KVA/CV	KVA/KW
> 0.54 ≤ 8.6	> 0.4 ≤ 6.3	9.6	13
> 8.6 ≤ 34	> 6.3 ≤ 25	8.8	12
> 34 ≤ 140	> 25 ≤ 100	8.1	11
> 140 ≤ 860	> 100 ≤ 630	7.4	10

Donde:
I_P : corriente con rotor bloqueado o de arranque (amp.)
V: tensión nominal (voltios).
P : potencia nominal (cv ó kw).

10.2 INDICACION DE LA CORRIENTE.
La indicacion del valor de la corrienye de rotor bloqueado en la placa de identeficacion del motor es hecha a traces de la letra codigo normalizado que da la indicacion de la faja de los valores KVA/CV.
Los valore correspondientes a estas letras del codigo de arranque se muestran en la tabla 6.
Los valores del torque de arranque son especializados por las normas NEMA (MGI 1978 PARTE 12)EIEC(PUBLIC.34-12)quienes dan los requerimientos minimos de torque. Deben observarse que las normas NEMA son mas rigurosas para definir las caracteristicas de torque,definiendo el diseño A,B,C,D.
mientras las normas iec solo distinguen dos tipos de diseño:EIN (motor trifasico de torque normal)yH(motor trifasico de alto torque de arranque)

la corriente de arranque se especifica de azcuerdo a las normas de fabricacion, haciendo dos alternativas que son.

- ✓ Los fabricantes que utilizan las normas IEC especifican directamente relacion I_p/I_n.
- ✓ los fabricantes queutilizan las normas NEMA especifican indirectamente la corriente de arranque por una letra de codigo que indica la relacion de los KVA de arranque y los HP ó CV nominales.

$$I_{arra} = \frac{(letra\ de\ codigo)HP1000}{\sqrt{3}V}$$

$$codigo\ de\ aranque - KVA/CV = \frac{\frac{I_P}{I_N}0.736}{EF.FP}$$

Donde: EF : eficiencia. FP : factores. HP:potencia útil puede ser CV.

TABLA N° 6.- RELACIÓN DE LOS KVA DE ARRANQUE POR HP CONFORME A LAS NORMAS NEMA IEC

CODIGO	KVA / HP	KVA / CV
A	0.10 - 3.14	0.10 - 3.14
B	3.15 - 3.54	3.15 - 3.54
C	3.55 - 3.99	3.55 - 3.99
D	4.00 - 4.49	4.00 - 4.49
E	4.50 - 4.99	4.50 - 4.99
F	5.00 - 5.59	5.00 - 5.59
G	5.60 - 6.29	5.60 - 6.29
H	6.30 - 7.09	6.30 - 7.09
J	7.10 - 7.99	7.10 - 7.99
K	8.00 - 8.99	8.00 - 8.99
L	9.00 - 9.99	9.00 - 9.99
M	10.00 - 11.19	10.00 - 11.19
N	11.20 - 12.49	11.20 - 12.49
P	12.50 - 13.99	12.50 - 13.99
R	14.00 - 15.99	14.00 - 15.99
S	16.00 - 17.99	16.00 - 17.99
T	18.00 - 19.99	18.00 - 19.99
U	20.00 - 22.39	20.00 - 22.39
Y	22.4 a mas	22.4 a mas

11 ECUACIÓN MECÁNICA

Se trata de equilibrar la energía eléctrica absorbida por los arrollamientos del estator y la potencia mecánica entregada por el eje de la maquina rotativa. Para relacionar esta transferencia entregada por el eje de la maquina rotativa. para relacionar esta transferencia de energía eléctrica a mecánica es que se utiliza la siguiente ecuación a la que llamamos ecuación mecánica.

$$T_a = T_e - T_L = J_{TOTAL}PW_m + D_{TOTAL}W_m$$

Donde:

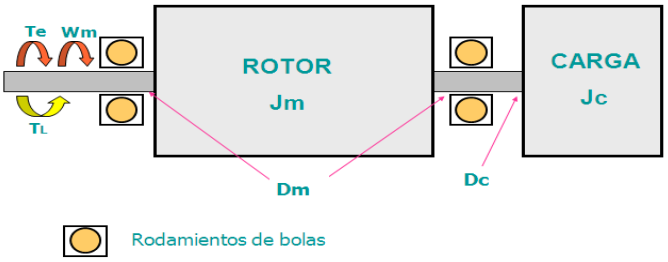
Te : torque electromagnético (N-m).
T_{total} : torque de la carga (N-m).
J_{total} : momento de inercia(Kg-m^2).
D_m : velocidad angular (Rad/seg).
D_{total} : coeficiente de fricción(N-m-seg).
p : derivada con respecto al tiempo.

La ecuación mecánica resulta viable siempre cuando exista un torque acelerado es decir para que exista movimiento el torque electromagnético de ser mayor que el torque resistente de la carga, tal como lo señala a continuación $Te > T_L$

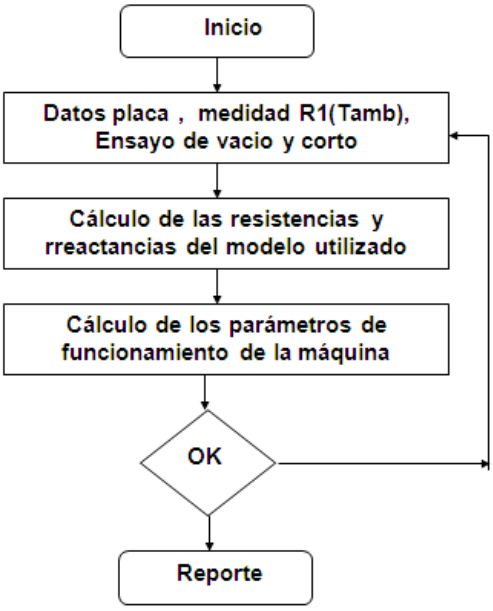
$J_{TOTAL} = J_{ROTOR} + J_{CARGA}$ y $D_{TOTAL} = D_{ROTOR} + D_{CARGA}$

El torque ELECTROMAGNETICO tendrá su trabajo principal en la carga y la potencia mecánica en el eje del motor (HP) Ó potencia neta (la que se encuentra en los catálogos del fabricante).tiene una relación directa con la velocidad angular a la cual se desplaza la masa girante.

$$Te - T_L = J_{TOTAL}\, p\, WM + D_{TOTAL}\, WM$$



FLUJOGRAMA



CONCLUSIONES

1.-El software EMRAT realiza la simulación del funcionamiento de los motores asíncronos trifásicos (en vacío y con carga),emitiendo un reporte minucioso y preciso en las diferentes regiones de trabajo de la máquina.Ademas nos proporciona las curvas de torque,corriente ,eficiencia y factor de potencia.

2 .-Variando el deslizamiento de 1 a 0 podemos ir variando los parámetros de los motores desde el arranque hasta su trabajo en vacio,pasando por el torque y potencia máxima (máxima transferencia de potencia).

3.-Queda demostrado que para un deslizamiento llamado Smax se produce una máxima potencia y por ende un máximo torque (caracteristica fundamental de las máquinas rotativas).
4.-En consecuencia,con la utilización de esta herramienta podemos evaluar a plenitud todos y cada uno de los parámetros de los motores asíncronos trifásicos.
5.-Se ha determinado que las variaciones del torque son directamente proporcionales a R_2'.
6.-Finalmente este paquete computacional puede ser utilizado en la verificación de los motores asíncronos trifásicos de pequeño,mediano y gran porte.

PROBLEMAS TIPOS

Probema N° 1.- se tiene un motor trifasico 3Ø tipo jaula de ardilla de 380 voltios, 7amp, 60HZ, 1150 RPM, NEMA B, aislamiento F, utiliza un bobinado imbricado de doble capa.el motor solamente tiene tres terminales, conexión Δ y ha sido sometido a ensayos de vacio y de corto circuito. Aplicando el metodo voltio-amperimetrico al estator los instrumentos instalados midieron 12 V_{CC} y 3.4582 Amperios, siendo la temb.20°C y trabajo 95°C completar la tabla de respuestas y graficos adjuntos en los dos problemas.

ENSAYO EN VACIO S=1.5%		
V_{RS}(V)	I_R(A)	P(W)
240	2	240
280	2.4	280
320	2.9	320
360	3.5	420
400	4.5	540

ENSAYO ROTOR BLOQUEADO		
V_{RS}(V)	I_R(A)	P(W)
60	3.8	200
80	5.3	340
100	6.7	510
120	7.4	660

SOLUCION:

$R_1(AC) = ?$ $\qquad R_T = \dfrac{12}{3.4582} = 3.4700\ \Omega$

$R_1 = 1.5\ x\ R_T \qquad R_1 = 5.205\ \Omega\ (20^0C) \qquad R_1(95^0C) = 6.7392\ \ \Omega$

$R_1(95°C) = 5.205\big(1 + 0.00393(95 - 20)\big) = 6.7392\ \Omega$

$R_1(AC) = K\ x\ R_1(95^0C) \qquad X = 0.063598\sqrt{\dfrac{uF}{R_1(95^0C)}} = 0.1898$

$K \approx 1.0001 \quad (VER\ TABLA\ N^01\ \ EFECTO\ SKIN)$

$R_1(AC) = 6.7392\ \Omega \qquad \boldsymbol{R_1 = 6.7398\ \Omega}$

ENSAYO VACIO 3Ø CONEX. Δ

3.5 A 360 Voltios
X 380 Voltios X = 4 Amperios
4.5 A 400 Voltios

$V_\emptyset = 380V \qquad I_\emptyset = 4A \qquad P_\emptyset = 480\ W$

ENSAYO VACIO 1Ø CONEX. 1Ø

$V_\emptyset = 380V$ $\quad I_\emptyset = 2.31\ A$ $\quad P_\emptyset = 160\ W$ $\quad Z_\emptyset = \dfrac{380}{2.31} = 164.5022\ \Omega/f$

$R_\emptyset = \dfrac{160}{2.31^2} = 29.9844\ \Omega\ /\ f = R_1 + R_M$ $\quad X_\emptyset = 161.7464\ \ \Omega = X_1 + X_M$

$\mathbf{R_M = 23.2446\ \ \Omega/f.}$ $\quad \mathbf{X_M = 152.0866\ \ \Omega/f}$

ENSAYO CORTO CIRCUITO 3Ø CONEX. Δ

6.7 A	510 Vatios		100 Volt.	510 Vatios.	
7 A	X	X = 574.29 Vatios	X	574.29 vatios	X = 108.57 Voltios
7.4 A	660 Vatios		120 Volt.	660 Vatios	

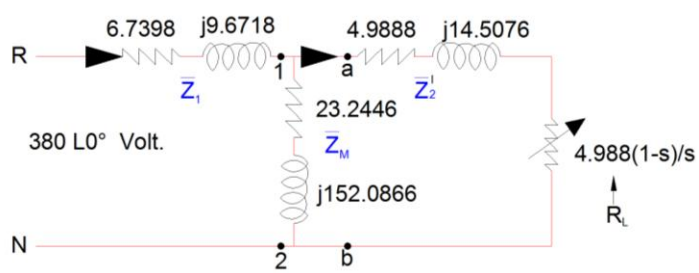
$V_{CC} = 108.57\ Voltios$ $\quad I_{CC} = 7A$ $\quad P_{CC} = 574.29\ Vatios$

ENSAYO CORTO CIRCUITO 1Ø CONEX. DE FASE

$V_{CC} = 108.57\ V$ $\quad I_{CC} = 4.04\ \ A$ $\quad P_{CC} = 191.43\ \ W$ $\quad Z_{CC} = \dfrac{108.57}{4.04} = 26.8738\ \ \Omega/f$

$R_{CC} = \dfrac{191.43}{4.04^2} = 11.7286\ \ \Omega = R_1 + R_2^{'}$ $\quad X_{CC} = 24.1794\ \ \Omega$ $\quad \boldsymbol{X_1 = 0.4\ X_{CC} = 9.6718\ \ \Omega/f}$

$\boldsymbol{R_2^{'} = 4.9888\ \dfrac{\Omega}{f}}$ $\quad \boldsymbol{X_2 = 0.6\ X_{CC} = 14.5076\ \ \Omega/f}$



$\overline{Z_1} = 6.7398 + j9.6718 = 11.7885\ \angle 55.13^0\ \Omega/f$ $\quad \overline{Z_2^{'}} = 4.9888 + j14.5076 = 15.3414\ \angle 71.02^0\ \ \Omega/f$

$\overline{Z_M} = 23.2446 + j152.0866 = 153.8535\angle 81.31^0$

CARATERÍSTICAS NOMINALES

$s = \dfrac{(1200 - 1150)}{1200} = 0.0417$ $\quad R_2^{|}\dfrac{(1-s)}{s} = 114.6467\ \ \Omega/F = R_L$

$\overline{Z_{ab}} = \overline{Z_2^{|}} + R_2^{|}\dfrac{(1-s)}{s} = 15.3414\angle 71.02^0 + 114.6467\angle 0^0$ $\quad \overline{Z_{ab}} = 120.5127\angle 6.91^0\Omega$

$\overline{z_{12}} = \overline{z_{ab}}\ //\ \overline{z_M} = \dfrac{120.5127\angle 6.91^0 x\ 153.8535\angle 81.31^0}{219.4686\angle 49.38^0}$ $\quad \overline{z_{12}} = 84.4717\angle 38.84^0$

$\overline{z_{RN}} = \overline{z_1} + \overline{z_{12}} = 96.8440\angle 40.82^0$ $\quad \boldsymbol{\overline{I_1} = \dfrac{380\angle 0^0}{96.8440\angle 40.82^0} = 3.9238\ \angle -40.82^0\ \ Amperios}$

$\boldsymbol{FP} = COS\emptyset = COS40.82^0 = \mathbf{0.7568}\ \ \boldsymbol{I}$ $\qquad \overline{V_{12}} = 380\angle 0^0 x \dfrac{\overline{Z_M}}{\overline{Z1} + \overline{ZM}} = 380\angle 0^0 - \overline{Z_1}\ x\ \overline{I_1}$

$\overline{V_{12}} = 380\angle 0^0 - 46.2557\ \angle 14.31^0 = 335.3744\ \angle -1.95^0\ \ Voltios$

$\overline{I_2^{|}} = \dfrac{\overline{V_{12}}}{\overline{Z_{ab}}} = \dfrac{335.3744\ \angle -1.95^0}{120.5127\ \angle 6.91^0} = 2.7429\ \angle -8.86^0\ \ Amperios$

$\boldsymbol{P_{UTIL}} = 3\overline{I_2^{|}}^2 R_L = 3x2.7429^2 x114.6467 = \mathbf{2.588}\ \ \boldsymbol{KW}$

$\boldsymbol{T} = \dfrac{2.588}{1150\frac{\pi}{30}} = \mathbf{21.4901}\ \ \boldsymbol{N-m}$ $\qquad \boldsymbol{T} = \dfrac{21.4901}{9.8} = \mathbf{2.1929}\ \boldsymbol{Kg-m}$

$n = \dfrac{P_{UTIL}}{P_{IN}} = \dfrac{2588}{3385.3} = 0.7645$ $\qquad \boldsymbol{P_{ing.}} = 3x380x3.9238x0.7568 = \mathbf{3385.3}\ \boldsymbol{Vatios}$ $\qquad \boldsymbol{n} = \mathbf{76.45}\ \%$

CARATERÍSTICAS EN EL ARRANQUE

$s = 1$ $\qquad R_L = 0$ $\qquad \bar{Z}_{ab} = Z_2^{|} = 15.3414\angle 71.02^0\ \ \Omega/f$

$\bar{Z}_{ab} = \dfrac{15.3414\ \angle 71.02^0 x153.8535\ \angle 81.31^0}{168.9704\ \angle 80.38^0}$ $\qquad \bar{Z}_{12} = 13.9689\ \angle 71.95^0\ \ \Omega$

$\bar{Z}_{RN} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_{12} = 25.4824\ \angle 64.25^0$ $\qquad \bar{I}_1 = \dfrac{380\ \angle 0^0}{25.4824\ \angle 64.25^0} = 14.9122\ \angle -64.25^0\ \ Amperios$

$FP = COS64.13^0 = 0.4363$

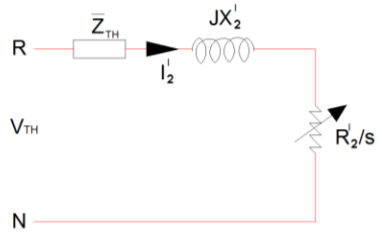
$\bar{V}_{12} = 380\angle 0^0 - \bar{I}_1 x\bar{Z}_1 = 380\angle 0^0 - 14.9122\ \angle -64.13^0\ x\ 11.7885\ \angle 55.13^0$

$\bar{V}_{12} = 380\angle 0^0 - 175.7925\ \angle -9.00^0 = 208.1960\ \angle 7.59^0\ V$

$I_2^{|} = \dfrac{\bar{V}_{12}}{\overline{Z_2^{|}}} = \dfrac{208.1960\ \angle 7.59^0}{15.3414\ \angle 71.02^0} = 13.5709\ \angle -63.43^0 A$ $\qquad P_{UTIL} = 3x13.5791^2 x\ 4.9888 = 2759.68\ \ vatios$

$T = \dfrac{2759.68}{1200\frac{\pi}{30}} = 21.9608\ \ N-m\ \ =\ \ 2.2409\ \ \ Kg-m$

CARACTRÍSTICAS DEL TORQUE MAXIMO.



$\bar{Z}_{TH} = \dfrac{\bar{Z}_1 x\ \bar{Z}_M}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_M} = \dfrac{11.7885\angle 55.13^0 x\ 153.8535\angle 81.31^0}{164.5149\ \angle 79.49^0}$

$\bar{Z}_{TH} = 11.0245 \angle 56.95^0 \ \ \Omega \ \ = \ \ \mathbf{6.0124 + j9.2407}$

$$\bar{V}_{TH} = 380\angle 0^0 x \frac{153.8535 \angle 81.31^0}{164.5149 \angle 79.49°} = 355.3741 \angle 1.82^0 \ \ Voltios$$

$$s_{max} = \frac{4.9888}{Z_{TH} + JX_2^{|}} = \frac{4.9888}{\sqrt{6.0124^2 + (9.2407 + 14.5076)^2}} = \frac{4.9888}{24.4976} = 0.2036$$

$$R_L = \frac{4.9888\ (1 - 0.2036)}{0.2036} = 19.5141\Omega \qquad \bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_2^{|} + R_L\angle 0^0 = 28.4762\angle 30.63^0$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{ab}\frac{\bar{Z}_M}{\bar{Z}_{ab} + ZM} = \frac{28.4762 \angle 30.63^0\ x\ 153.8535\angle 81.31^0}{173.3033 \angle 74.00^0} = 25.2803 \angle 37.94^0$$

$$\bar{I}_1 = \frac{380\angle 0^0}{11.7885 \angle 55.13^0\ + 25.2803 \angle 37.94°} = \ 10.3520 \angle -43.39^0 \ \ Amperios \qquad FP = COS43.39^0 = 0.7267\ I$$

$$\bar{V}_{12} = 380\angle 0^0 - 10.3520 \angle -43.39^0 x 11.7885 \angle 55.13^0 = 261.6989 \angle -5.44^0 \ \ Voltios$$

$$\bar{I}_2 = \frac{261.6989 \angle -5.44^0}{28.4762 \angle 30.63^0} \ = \ \ 9.1901 \angle -36.07^0 \ \ Amperios$$

$$P_{UTIL} = 3xI_2^{|\,2}xR_L = 3x9.1901^2x19.5141 = 4944.36 \quad Vatios$$

$$T = \frac{4944.36}{100.1} = 49.3942\ \ N - m \qquad T \ = \ \ 5.0402\ \ Kg - m.$$

$$0.2036 = \frac{1200 - Wm}{1200} \qquad w_m = 955.7\ RPM \qquad w_m = 955.7x\frac{\pi}{30} = 100.1\ rad/seg$$

$$P_{IN} = 3x380x10.3520\ x\ 0.7267 = \ \ 8576\ \ Vatios.$$

CARACTERÍSTICAS EN VACIO

$S1\emptyset = 0.015$ 1182 RPM $R_L = 327.5979$ $\bar{Z}_{ab} = 332.9038 \angle 2.5^0$

$$\bar{Z}_{12} = 153.8535 \angle 81.31^0 x \frac{332.9038 \angle 2.5^0}{392.9059 \angle 25.1^0} = 130.3580 \angle 58.71^0 \ \ \Omega/f$$

$$\bar{Z}_{RN} \ = \ \bar{Z}_{12} + \ \bar{Z}_1 \ \ = \ 130.3580 \angle 58.71^0 \ + 11.7885 \angle 55.13^0 \ \ = \ \ 142.1254 \angle 58.41^0 \qquad \Omega/f$$

$$\bar{I}_1 \ = \frac{380\angle 0^0}{142.1254 \angle 58.41^0} = 2.6737 \angle -58.41^0 \ \ Amperios \qquad FP = COS58.41^0 = 0.5238\ \ I$$

$$\bar{V}_{12} = 380\angle 0^0 - \ \bar{Z}_1\bar{I}_1 = 380\angle 0^0 - 11.7885 \angle 55.13^0\ x\ 2.6737 \angle -58.41^0$$

$$\bar{V}_{12} = 380\angle 0^0 - 31.5189 \angle -3.28^0 = 348.5374 \angle 0.30^0 \ \ Voltios$$

$$\bar{I}_2^{|} \ = \frac{348.5374 \angle 0.30^0}{332.9038 \angle 2.5^0} = 1.0470 \angle -2.20^0 \quad Amperios$$

$$P_{UTIL} = 3xI_2^{|\,2}xR_L = 3x1.0470^{\ 2}\ x\ 327.5979 = 1077.3473\ \ Vatios$$

$0.015 = \frac{1200 - Wm\phi}{1200}$ $\quad w_{m\phi} = 1182\ RPM$ $\quad w_{m\phi} = 1182\ x \frac{\pi}{30} = 123.7788\ \ rad/seg$

$T_{UTIL} = \frac{1077.3473}{123.7788} = 8.7038\ \ N - m$ $\quad T_{UTIL} = 0.8881\ \ Kg - m$

Probema N° 2.- Un motor trifásico USMTORS tipo jaula de ardilla, clase NEMA D, Ttrabajo 90°C, 440 Voltios, 60 Hz., 4 polos, conectado en Y ha sido sometido a los ensayos de rutina obteniéndose los resultados siguientes:
Ensayo en vacío:

Vo (Voltios)	240	280	320	360	400	440	460	480
Io (Amperios)	3.90	4.40	5	5.6	6.0	6.4	6.8	7.5
Po (Vatios)	140	180	240	300	360	420	468	540
RPM	1742	1750	1780	1783	1786	1790	1790	1790

Ensayo de rotor bloqueado: Vcc = 146.67 Voltios, Icc = 19 Amperios, Pcc = 1249.35 Vatios. Tambiente = 26.39°C. La potencia rotacional midió 220 vatios. Cuando el motor trabajaba a plena carga se registró 1719 RPM, en éstas condiciones se le solicita hallar:
1.- El circuito equivalente monofásico valorado.
2.- Las características de funcionamiento en: Plena carga, vacío, arranque y máximo.

SOLUCCION

$R_1 = \frac{1\,\mathrm{V}}{2\,\mathrm{A}}$ conexión Y $\quad R_1 = 0.5\frac{12}{14.4231} = 0.4160\ \Omega$ a $\mathrm{T_{amb.}}$

$R_1 = 0.5\ x\ R_T$ $\quad R_1 = 0.4160\ \Omega\ (26.39^0C)$ $\quad R_1(90^0C) = 0.52\ \ \Omega$

$R_1(90°C) = 0.4160\left(1 + 0.00393(90 - 26.39)\right) = 0.52\ x\ 1.25 = 0.52\ \ \Omega/\mathrm{f}$

$R_1(AC) = K\ x\ R_1(90^0C)$ $\quad X = 0.063598\sqrt{\frac{uF}{R_1(90^0C)}} = 0.6832$

0.6 ……. 1.0006
0.6832 …… X X = 1.0011
0.7 …… 1.0012

$K = 1.0011 \quad (VER\ TABLA\ N^0 1\ \ EFECTO\ SKIN)$

$R_1(AC) = 0.52\ x\ 1.0011 = \mathbf{0.5206\ \ \Omega/f}$

CARATERÍSTICAS DE VACÍO

ENSAYO VACIO 3Ø CONEX. Y

$V_\emptyset = 440\ V$ $\quad \mathrm{I}_\emptyset = 6.4\ \mathrm{A}$ $\quad \mathrm{P}_\emptyset = 420\ \ \mathrm{Vatios}$

ENSAYO VACIO 1Ø CONEX. 1Ø

$V_\emptyset = 254\ V$ $\quad \mathrm{I}_\emptyset = 6.4\ \ \mathrm{A}$ $\quad \mathrm{P}_\emptyset = 140\ \mathrm{W}$ $\quad Z_\emptyset = \frac{254}{6.4} = 36.9875\ \ \Omega/f$

$R_{\emptyset} = \dfrac{140}{6.4^2} = 3.4180 \;\; \Omega\,/\,\mathrm{f} = R_1 + R_M$ $\qquad X_{\emptyset} = 36.8292 \;\; \Omega = X_1 + X_M$

$\mathbf{R_M = 2.898\ \frac{\Omega}{f}}$. $\qquad \mathbf{X_M = 34.677 \quad \Omega/f}$

ENSAYO CORTO CIRCUITO 3Ø CONEX. Y

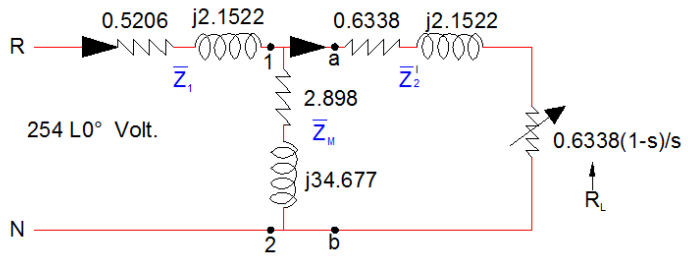
Vcc = 146.67 Voltios, Icc = 19 Amperios, Pcc = 1249.35 Vatios.

ENSAYO CORTO CIRCUITO 1Ø CONEX. DE FASE

$V_{CC} = 84.67\ Voltios \qquad I_{CC} = 19\ A \qquad P_{CC} = 416.45\ W \qquad Z_{CC} = \dfrac{84.67}{19} = 4.4563 \;\; \Omega/\mathrm{f}$

$R_{CC} = \dfrac{416.45}{19^2} = 1.1536\ \Omega = R_1 + R_2^{'} \qquad X_{CC} = 4.3044\ \Omega \qquad \boldsymbol{X_1 = 0.5\, X_{CC} = 2.1522\ \Omega/f}$

$\boldsymbol{R_2^{'} = 0.6338\ \frac{\Omega}{f}} \qquad \boldsymbol{X_2 = 0.5\, X_{CC} = 2.1522\ \Omega/f}$



$\overline{Z_1} = 0.5206 + j2.1522 = \cdots \;\; \llcorner \ldots.\ \Omega\frac{}{f} \qquad \overline{Z_2} = 0.6338 + j\,2.1522 = \cdots \;\; \llcorner \ldots.\ \Omega/f$

$\overline{Z_M} = 2.898 + j334.677 = \cdots \ldots.\ \llcorner \ldots\ldots\ \Omega/f$

TREA DOMICILIARIA

CARATERÍSTICAS NOMINALES CARATERÍSTICAS EN EL ARRANQUE

CARACTRÍSTICAS DEL TORQUE MAXIMO. CARACTERÍSTICAS EN VACIO

Probema N° 3.- El motor marca USMTORS tipo jaula de ardilla, doble jaula, clase NEMA B, Ttrabajo 90°C, 3ϕ, 380 Voltios, 60 HP, 60 Hz., 2 polos, EF 90% y FP 0.91 con 09 terminales, conexión exterior Y e interior 2 x ll, fue sometido a los ensayos de rutina encontrándose los siguientes resultados:
Ensayos de vacío:

Vo (Voltios)	433	416	398	364	346	330	
Io (Amperios)	27.2	23.7	21.4	17.3	15.6	13.9	
Po (Vatios)	2690	2150	1800	1370	1150	800	

Ensayos a rotor bloqueado: Vcc = 58.8 Voltios, Pcc = 3800 Vatios.

Antes de realizar los ensayos se midió la resistencia estatórica, entre los bornes del estator a Tamb.19°C, registrándose en los instrumentos 1.029 Vdc y 14 A dc. En vacío y plena carga se registraron 99.7 y 98.5 % de los RPMs respectivamente. En éstas condiciones se le solicita determinar: Trabajar con 04 decimales.

1. El modelo monofásico del motor tipo jaula de ardilla.
2. Las caraterísticas nominales.
3. Las caraterísticas en el arranque .
4. Las caractrísticas del torque maximo.
5. Las características en vacio

Probema N° 4.- El motor marca GENERAL ELECTRIC tipo jaula de ardilla clase NEMA B, Ttrabajo 90°C, 3ϕ, 440 Voltios, 60 Hz., 2 polos, $\Delta\Delta$ fue sometido a ensayos de rutina encontrándose los siguientes resultados:

Vo (Voltios)	500	480	460	420	400	380	
Io (Amperios)	30	24.5	20	15.5	13	11.8	
Po (Watios)	3600	3200	3050	2550	2436	1915	

Rotor bloqueado: Vcc = 84.15 V, Icc = 110 A, Pcc = 6013 Vatios.
En el diseño del presente motor se han tomado las precauciones debidas (ALTA EFICIENCIA) de tal forma que las pérdidas rotacionales y de fricción sean despreciadas. Trabajar únicamente con 04 decimales. Trabajando con carga se registra 95 % RPMsinc. Antes de realizar los ensayos se midió la resistencia estatórica, entre los bornes del estator a Tamb.19°C, registrándose en los instrumentos 0.4423 Vdc y 7.01 A dc. Se le solicita determinar:

1. El modelo monofásico del motor tipo jaula de ardilla.
2. Las caraterísticas nominales.
3. Las caraterísticas en el arranque .
4. Las caractrísticas del torque maximo.
5. Las características en vacio

Probema N° 5.- Se tiene un motor de inducción 3ϕ de 10 HP, 60 Hz, 120 Voltios, 04 polos. Los parámetros del motor son los siguientes: R1= 0.3 (Tamb.= 18°C y Ttrab.= 90°C.), X1= 0.5, RM = 50, XM = 16, R2'= 0.2 y X2' = 0.2 Ω respectivamente. El motor debe ser arrancado utilizando el método Y - Δ. Se le pide hallar:
Se le solicita determinar:

1. Las caraterísticas nominales.
2. Las caraterísticas en el arranque .
3. Las caractrísticas del torque maximo.
4. Las características en vacio
5. Si la conmutación Y-Δ se realiza a un 75% de la velocidad sincronía se le solicita hallar el torque y corriente que deja la conexión estrella y el torque y corriente con que entra el Δ.