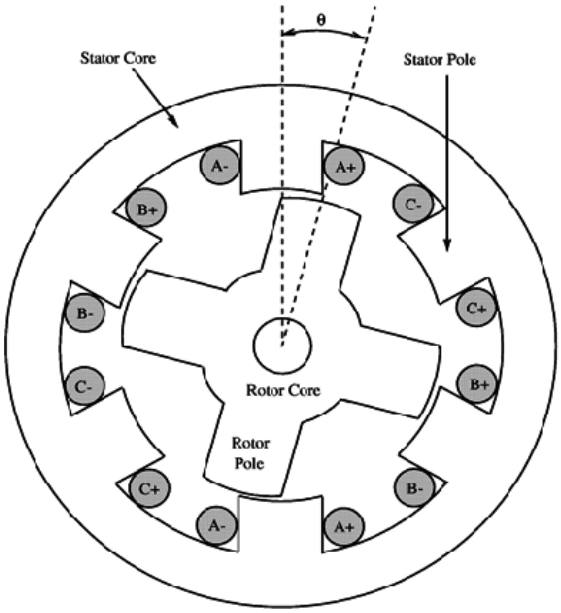
INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Parcial N°1 – 26 de setiembre de 2019.

Problema No. 1 (50%)

En la figura siguiente se muestra un motor de reluctancia conmutada 6/4 (6 polos de estator y 4 de rotor).



El motor cuenta con tres bobinados en el estator, cada uno de los cuales se alimenta desde una fuente independiente que genera corriente en forma de pulsos de amplitud constante, como se observa en la figura 2. Se puede asumir que el hierro es de permeabilidad infinita.

Se pide:

1) Graficar en forma cualitativa la autoinductancia de la bobina número 1 en función del ángulo $L_{AA}(\theta)$, justificando la forma de onda resultante y explicando los puntos notables de la misma. (20%)

2) En un nuevo gráfico, dibuje en forma superpuesta a $L_{AA}(\theta)$, la autoinductancia de la bobina B. (20%)

3) Calcular la energía magnética almacenada en el dispositivo para la posición θ=0°, suponiendo que i_A=1 A, N_A=100, el entrehierro mide 1mm de espesor y la sección transversal de cada polo de la máquina es 20cm^2 ($\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ N.A^{-2}). (10%)

4) Graficar en función de θ, en forma cualitativa, el torque sobre el rotor cuando se alimenta la bobina de la fase A con corriente positiva constante. Justifique el gráfico realizado. (20%)

5) Explicar en forma cualitativa cómo se puede lograr un movimiento continuo en el rotor, alimentando las bobinas con pulsos de corriente (no solapados en el tiempo). Representar en un gráfico en función del ángulo los pulsos de corriente necesarios en las bobinas A, B y C. (30%).

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA

Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Parcial N°1 – 26 de setiembre de 2019.

Problema No. 2 (50%)

Un transformador T1 de 10 MVA con regulación bajo carga de 9 pasos en un rango ± 5% (tap), alimenta una fábrica cuya potencia contratada es 7.5 MW con cos(φ) = 0.92.
La red de alimentación es de 30.0 kV. Se planifica un aumento de la demanda de un 30%, conservando el cos(φ). A efectos de evitar sobrecargas por las futuras ampliaciones se evalúa comprar otro transformador T2 similar (pero sin RBC) y de la misma potencia nominal. La tensión nominal del primario de T2 es 31.5 kV.
Dado que T1 y T2 no son exactamente iguales, se decidió realizar ensayos a T1 para conocer su situación actual, y definir en qué posición se colocará el RBC. Del T2 se cuenta con los datos del fabricante.

Datos:

T1: Ensayo de vacío 30 kV, 6.2 kV, 3.28 A (primario), 56 kW, 50 Hz.
Ensayo de cortocircuito 4 kV, 191 A, 430 kW, 50 Hz.
El grupo de conexión es Dy11.

Ambos ensayos se realizaron con el RBC en la posición 5 (posición central). Para simplificar el problema se supondrá que los valores de las impedancias de vacío y cortocircuito de T1, así como la corriente nominal no varían al cambiar la posición de los taps.

T2: El fabricante provee la siguiente curva dado un ensayo en vacío a 50 Hz y alimentado por el secundario.

Us(kV)	2	4	5	5.75	6.3	6.6	6.8
Is(A)	4.85	5.86	6.84	7.57	8.23	8.85	9.47
Ps(kW)	6.7	14.6	21.3	27.1	32.3	36.4	40.1
Up(kV)	9.87	19.75	24.68	28.38	31.10	32.58	33.57

Ensayo con el secundario cortocircuitado: 3.3 kV, 185 A, 369 kW, 50 Hz.
El grupo de conexión es Dy11.

Se pide:

1) Elegir la posición del cambiador de tomas de T1 para minimizar la corriente de circulación en vacío si ambos transformadores se conectan en paralelo. (10%)

2) Asumiendo la posición anterior del cambiador de tomas para T1, y despreciando la eventual diferencia en las relaciones de transformación, determinar la máxima corriente que puede llevar T2 en régimen permanente sin sobrecalentarse. Y la máxima corriente que puede entregar el conjunto. (30%)

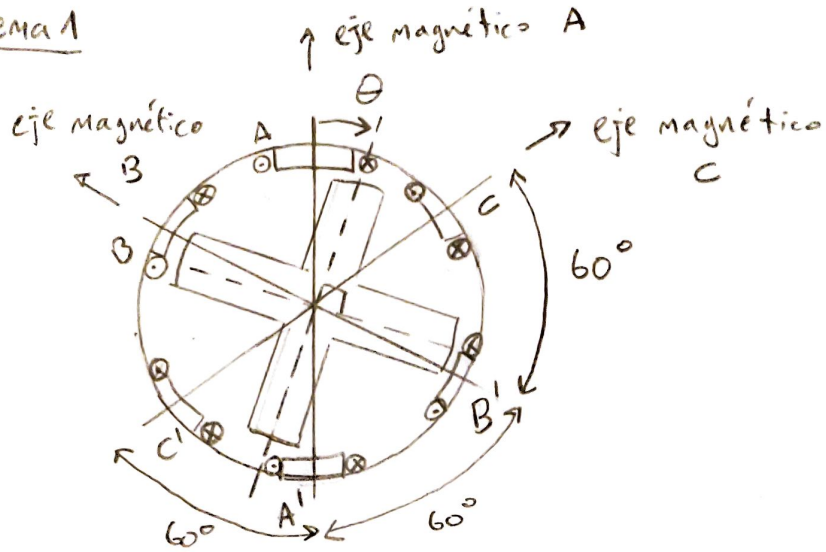
3) La otra posibilidad que se maneja para solucionar el tema del aumento de la carga es utilizar un transformador T3, Yy0, que actualmente está fuera de servicio. El T3 es de 31.5 kV/6 kV y su conexionado rígido. En este caso la idea es comprar tres transformadores monofásicos con RBC para conectarlos como desfasador en serie con T3 de modo que este conjunto pueda conectarse en paralelo con T1. Dibujar en un diagrama trifilar cómo realizar la conexión de los tres transformadores monofásicos para lograrlo. Asumir que la potencia nominal de los transformadores es suficiente. (40%)

4) Suponiendo que la RBC de los transformadores monofásicos sólo puede modificarse en el rango: 0.04 < N_S/N_P < 0.18, determinar si es posible realizar la operación en paralelo de T1 y T3 junto con el desfasador según el esquema planteado en 3).

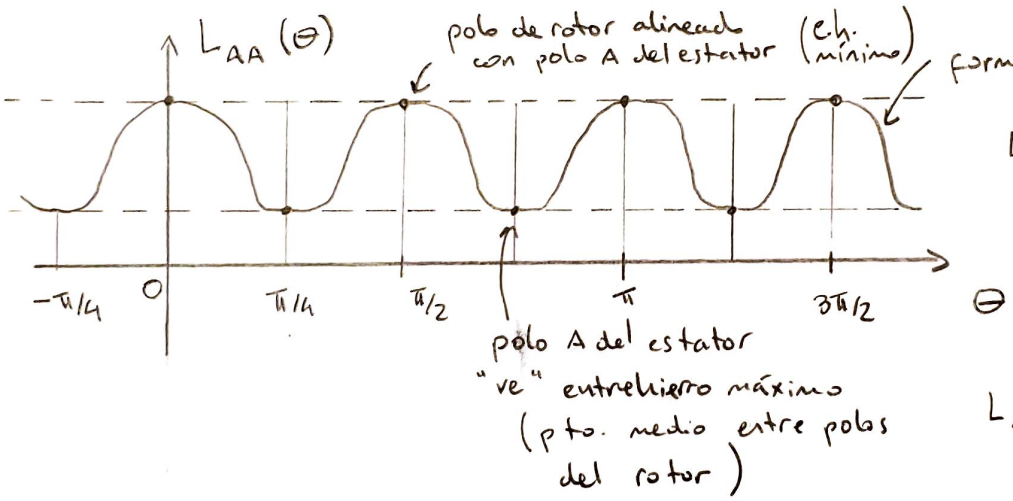
   En esta parte puede asumir que T3 tiene tantos pasos para regulación de sus taps, que su relación de transformación se adapta al valor que se desee dentro de un rango razonable. (20%)

Primer parcial Máquinas Eléctricas – 26/09/19 – Solución

Problema 1



1) Para calcular $L_{AA}(\theta)$ supongo que aplico i_A y evalúo el flujo magnético enlazado por la bobina A, para todo θ:



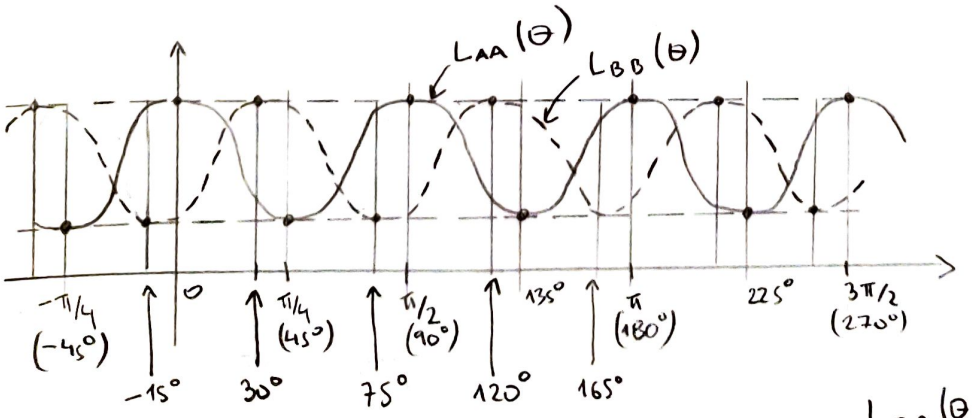
forma de onda de tipo:

$$L_{AA}(\theta) = L_0 + L_1 \cos(4\theta) + \sum_{i=1}^{\infty} L_i \cos(4k\theta)$$

en una primera aproximación

$$L_{AA}(\theta) \cong L_0 + L_1 \cos(4\theta)$$

2) $L_{BB}(\theta)$ tiene el mismo comportamiento que $L_{AA}(\theta)$ pero desfasado 30° debido a que 60° es la diferencia entre los ejes magnéticos de ambas bobinas, y los polos del rotor están a 90° entre sí:

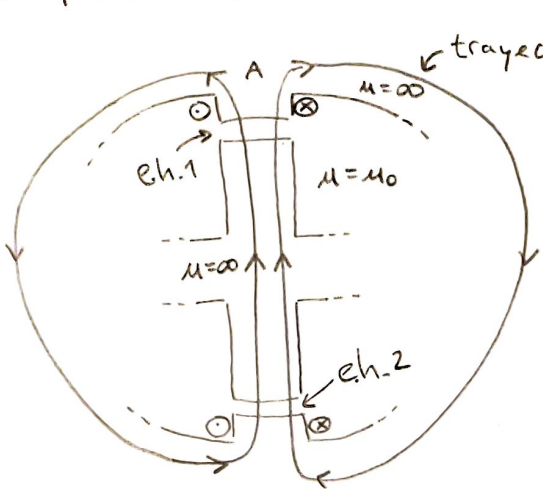


* mismo circuito magnético visto por lo tanto amplitudes de L_{AA} y L_{BB} son iguales, y valor medio también.

$$L_{BB}(\theta) \cong L_0 + L_1 \cos\left(4\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)\right)$$

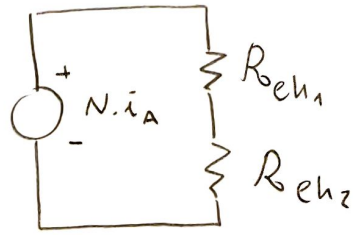
Prob. 1

3) En posición $\theta = 0°$:



trayectoria mayoritaria de las líneas de campo

Podemos asumir que el circuito magnético visto por la f.m.m. de la fase A se reduce a:



* no se considera reluctancia del hierro por ser $\mu_{Fe} \gg \mu_0$

* $R_{eh_1} = R_{eh_2}$
↑ mismas dimensiones

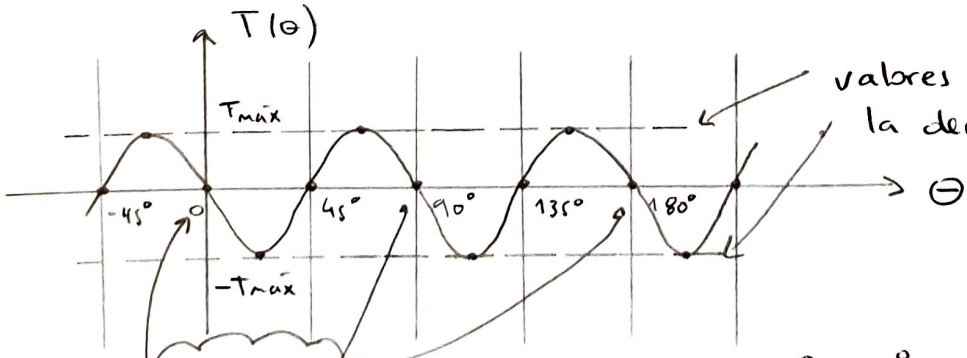
$$R_{eh_1} = \frac{1\,mm}{\mu_0 \cdot 20\,cm^2} = \frac{1\times10^{-3}\,m}{4\pi\times10^{-7}\,N/A^2 \cdot 20\times10^{-4}\,m^2} = \underbrace{\frac{1}{4\pi\cdot 20}\times10^{8}}_{3{,}979\times10^{5}}\ \frac{A^2}{Nm}$$

$$L_{AA}(\theta=0°) = \frac{N^2}{2R_{eh_1}} = \frac{10^4}{2\cdot 3{,}979\times10^5} = 12{,}57\ mHy$$

$$W_{almac.\ eh} = \frac{1}{2} L_{AA}\, i_A^2 = \boxed{6{,}28\times10^{-3}\ J}$$

$i_A = 1$

4) $$T = \left.\frac{\partial W'}{\partial\theta}\right|_{i=cte} = \frac{1}{2}\frac{\partial L_{AA}(\theta)}{\partial\theta} i_A^2 \cong -\frac{1}{2}\cdot 4\cdot L_1 \operatorname{sen}(4\theta)\cdot i_A^2$$



valores extremos iguales porque la derivada de L_{AA} en las transiciones es opuesta (por simetría)

ptos de eq. estables:
$\theta\uparrow \rightarrow T<0 \rightarrow \theta\downarrow$
$\theta\downarrow \rightarrow T>0 \rightarrow \theta\uparrow$

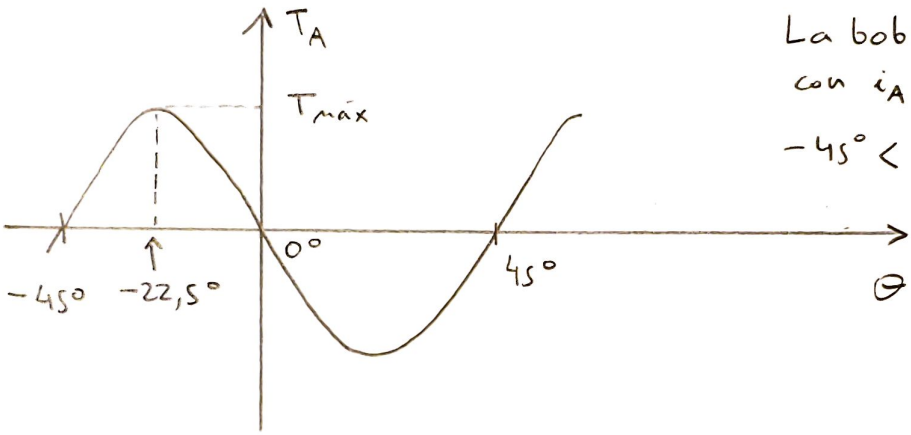
45°, 135°, 225°, ...
son ptos. de equilibrio inestables

Prob. 1

5) Si se alimenta en forma fija una sola bobina, el torque rotará el rotor y se ubicará en un pto. de equilibrio estable. → movimiento no continuo

Se debe alimentar las bobinas estatóricas secuencialmente para obtener un movimiento de giro continuo (par siempre >0 o <0).

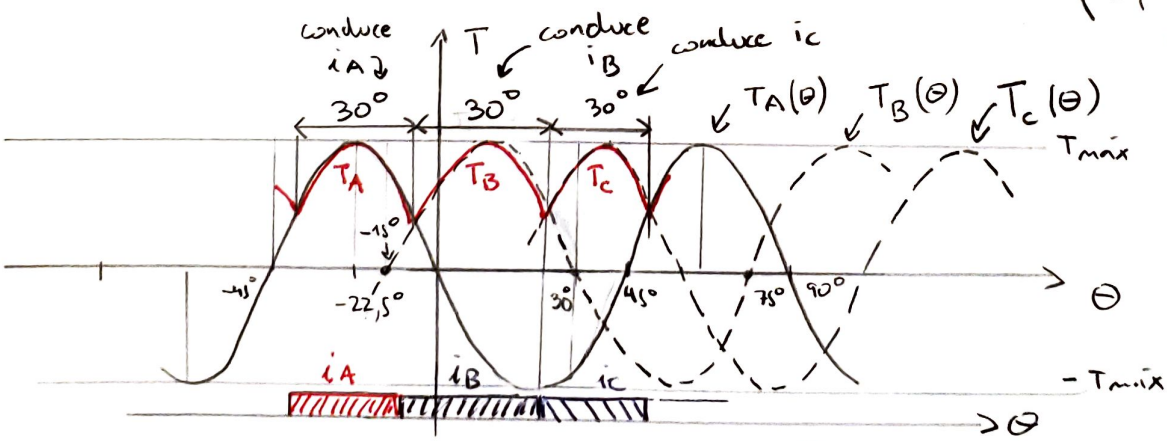
Consideremos por ejemplo la bobina A, el punto de mayor torque >0 está en $\theta = -22{,}5°$:



La bobina A al ser energizada con $i_A > 0$ aplicará un $T_A > 0$ con $-45° < \theta < 0°$, pasado $\theta = 0°$ se debe cortar i_A porque T_A se vuelve < 0

Si se busca que el torque sea siempre >0 se debe aplicar pulsos que completen todos los ángulos del rotor (en caso que para algún ángulo ninguna de las 3 corrientes sea ≠ 0, $T_{neto} = 0$). Para el motor 6/4 el óptimo sin solapar pulsos es que cada bobina se energice por 30° alrededor del ángulo de $T_{máx}$:

(3 fases, 90° entre polos del rotor, $\frac{90°}{3}$)



* para girar en sentido AH se permuta el orden de las corrientes

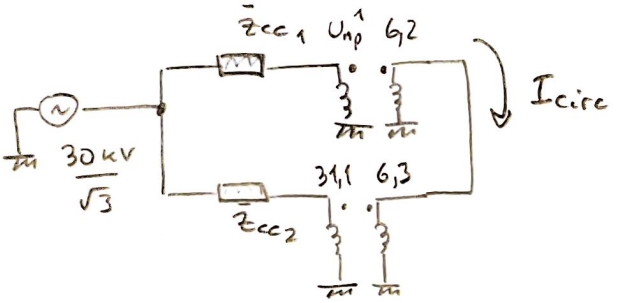
cada vez que el polo rotórico llega a 7,5° de alcanzar el polo estatórico que tiene corriente, ésta se corta y se energiza la siguiente bobina (con el mismo valor de T pero creciente).

* Si se conduce por más de 30° (hasta 45°) igual funciona pero se solapan pulsos en el tiempo (pasaría a existir interacción de par por ind. mutua)
* Si se conduce por menos de 30° el torque es intermitente.

Problema 2

1) taps:

5% → 9 ⟶ $U_{np} = 30kV \cdot 1{,}05 = 31{,}5kV$
3,75% → 8
2,5% → 7
1,25% → 6
0% → 5 ⟶ $U_{np} = 30\ kV$
4
3
2
1 ⟶ $U_{np} = 30kV \cdot 0{,}95 = 28{,}5\ kV$

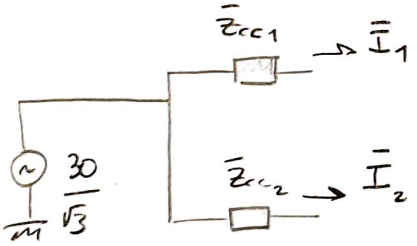


Se busca igualar lo más posible las dos relaciones de transformación:

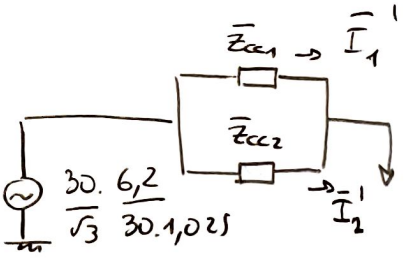
$$\frac{30 \cdot K_{tap}}{6{,}2} = \frac{31{,}1}{6{,}3} \rightarrow K_{tap} = 1{,}0202 \quad (2{,}02\ \%)$$

→ valor más cercano: +2,5 % | $\boxed{\text{tap } 7}$

2)



a nivel sec:



$$I_{n_{T_1}} = \frac{10\ MVA}{\sqrt{3} \cdot 30\ kV} = 192{,}5\ A \qquad I_{n_{T_2}} = \frac{10\ MVA}{\sqrt{3} \cdot 31{,}5\ kV} = 183{,}3\ A$$

$$|\bar{Z}_{cc_1}| = \frac{4\ kV}{\sqrt{3}\ 191\ A} = 12{,}09\ \Omega \qquad |\bar{Z}_{cc_2}| = \frac{3{,}3\ kV}{\sqrt{3}\ 185\ A} = 10{,}30\ \Omega$$

$$|\bar{Z}_{cc_1} \cdot \bar{I}_1| = |\bar{Z}_{cc_2} \cdot \bar{I}_2| \rightarrow \frac{|\bar{I}_1|}{|\bar{I}_2|} = \frac{|\bar{Z}_{cc_2}|}{|\bar{Z}_{cc_1}|} = 0{,}85\ \Omega$$

T_2 opera a $U < U_n$ $(U_n = 31{,}5kV)$ (mismas pérdidas)

@ 30kV: $P_0 = 30{,}2\ kW$ (tabla)
@ 31,5kV: $P_0 = 33{,}4\ kW$ → reducción 3,2 kW

$$3 I_{n_{T_2}}^2 \cdot R_{cc_2} + P_{0\,@30kV} = 3 \cdot 183{,}3^2 \cdot R_{cc_2} + P_{0\,@31{,}5kV} \rightarrow \boxed{I_{n_{T_2}\,@30kV} = 184{,}1\ A}$$

$R_{cc_2} = 3{,}59\ \Omega$

Problema 2

2) (cont.)

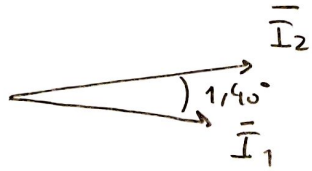
$|\bar{I}_1| = 184{,}1 \cdot 0{,}852 = 156{,}9\,A$ (limita T_2 en el paralelo)

$R_{cc_1} = \dfrac{430\,kW}{3.191^2} = 3{,}93\,\Omega \rightarrow X_{cc_1} = \sqrt{12{,}09^2 - 3{,}93^2} = 11{,}43\,\Omega \rightarrow \varphi_{Z_{cc_1}} = 71{,}0^\circ$

$R_{cc_2} = 3{,}59\,\Omega \rightarrow X_{cc_2} = 9{,}65\,\Omega \rightarrow \varphi_{Z_{cc_2}} = 69{,}6^\circ$

$\dfrac{\bar{Z}_{cc_2}}{\bar{Z}_{cc_1}} = \dfrac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2}$

$= 0{,}852 \angle -1{,}40^\circ$



$\rightarrow \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 341{,}0 \angle 0{,}75^\circ$

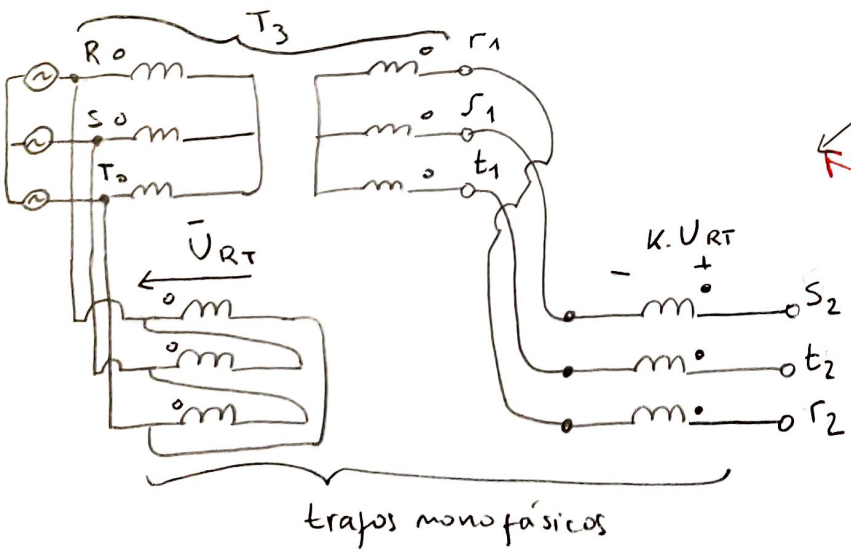
$$\boxed{|\bar{I}_1 + \bar{I}_2| = 341{,}0\,A}$$

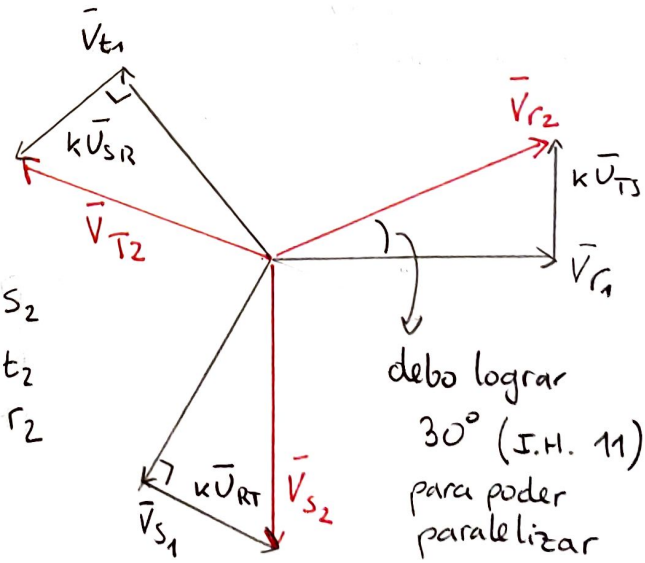
Comentario:

* dada la poca influencia que tiene la diferencia de tensión en P_0 y el efecto de R_{cc} en el ángulo de las Z_{cc}, podrían despreciarse ambos efectos y asumir suma colineal de $\bar{I}_1$ e $\bar{I}_2$, así como $I_{2n} = 183{,}3\,A$.

3) T_3 tiene índice horario 0, mientras que T_1 es 11 (no se pueden paralelizar).

Se agrega desfasador hecho con 3 trafos monofásicos:





debo lograr 30° (I.H. 11) para poder paralelizar con T_1

4) $|\bar{V}_{r_1}| = \dfrac{6}{31{,}5} \cdot \dfrac{30}{\sqrt{3}} = \dfrac{5{,}71\,kV}{\sqrt{3}} \rightarrow$ para desfasar 30°: $|k\bar{U}_{TS}| = tg30^\circ \cdot \dfrac{5{,}71}{\sqrt{3}} = \dfrac{3{,}30\,kV}{\sqrt{3}}$

$|\bar{U}_{TS}| = 30\,kV \rightarrow k = 0{,}063$ (dentro del rango)