

CONSIDERACIONES DE ARMONICAS EN LA MEJORA DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA EN POZOS DE BOMBEO PARA RIEGO Y AGUA POTABLE

ING. JUAN J. DEL CASTILLO
DEPTO. DE DISEÑO ELÉCTRICO - ELECTRONICO

STEM DAKTALAKTOR^{MR} ELECTRONICA DE POTENCIA

SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ, SAN LUIS POTOSI, S.L.P. MEXICO

Resumen:

La mejora del factor de potencia en los circuitos eléctricos lineales es bien sabida en cuanto a sus beneficios económicos y técnicos; sin embargo, las frecuencias armónicas no figuran en las

consideraciones de cálculo con fines de mejora del entorno electromagnético propio ni de los demás usuarios.

I INTRODUCCION

Los circuitos eléctricos para bombeo son equipo sencillos con subestaciones particulares y uno o varios motores asíncronos del tipo sumergible o flecha hueca; el factor de potencia es del orden del 82% en atraso y requiere de capacitores; sin embargo, en este artículo recomendamos desintonizar el filtro natural resultante de calcular e instalar los capacitores fuera de la acción de las armónicas comunes (5^a, 7^a, 11^a y 13^a) en la red, como una medida adicional para mitigar la propagación armónica. Presentamos una metodología para estos fines en un ejemplo real a continuación.

II EQUIPO DE BOMBEO PARA RIEGO AGRICOLA "OJO DE PINTO"

- *Trasformador:* 75 kVA; 13.2 kV/460 V.
- *Motor Sumergible:* 75 HP @ 440 V.
- *Mediciones eléctricas,* método de 3 vatímetros.

	FASE1	FASE2	FASE3	TOTAL
kW	20.36	16.78	18.00	55.14
kVar	16.41	14.70	12.91	44.02
FP	-0.78	-0.75	-0.81	0.78

NOTA: Las mediciones pueden ser totales en delta o desglosadas en estrella como aquí se presentan.

$$FP = \frac{FP1 + FP2 + FP3}{3} = \frac{kW_T}{\sqrt{kW_T^2 + kVar_T^2}}$$

$$= \frac{(0.78 + 0.75 + 0.81)}{3} = \frac{55.14}{\sqrt{55.14^2 + 44.02^2}}$$

$$= -0.78 \text{ en atraso.}$$

1.- Factor de Potencia Final (FP_(FIN)) y Potencia Reactiva Requerida (Q_{REQ}).

Comencemos compensando el factor de potencia (FP_{FIN}) al 98% y calculemos la potencia reactiva necesaria (Q_{REQ}) de los capacitores para este fin;

$$Q_{(REQ)} = P_T [\tan \cos^{-1} FP_{(INIC)} - \tan \cos^{-1} FP_{(FIN)}]$$

$$Q_{(REQ)} = 55.14kW [\tan \cos^{-1}(0.78) - \tan \cos^{-1}(0.98)]$$

$$= 33.041kVar$$

2.- Derrateo en Voltaje de la Potencia Reactiva requerida (Q_{REQD}).

Los voltajes medidos en operación fueron V₁₋₂:450 V_{RMS}; V₁₋₃:441 V_{RMS} y V₂₋₃:447 V_{RMS} lo que con promedio resulta:

$$V_{prom} = \frac{V_{1-2} + V_{1-3} + V_{2-3}}{3} = 447V$$

$$\Rightarrow Q_{REQD} = \frac{Q_{REQ}}{\left(\frac{V_{prom}}{V_F}\right)^2} = \frac{33.041kVar}{\left(\frac{447V}{480V}\right)^2}$$

$$= 38.09kVar @ 480V$$

V_F: Voltaje de fabrica de los capacitores.
Se eligen 40kVar por disponibilidad comercial.

3.- Capacitancia Equivalente de (Q_{REQD}) Referida al Primario $C_{(HV)}$.

$$C_{(HV)} = \frac{Q_{REQD}}{2\pi f_1 \cdot V_{LL(HV)}^2}$$

donde:

$V_{LL(HV)}$: Voltaje de primario (13.2kV).
 f_1 : Frecuencia de fundamental (60 Hz).

$$C_{(HV)} = \frac{40 \text{ kVar}}{2\pi(60\text{Hz})(13.2\text{kV})^2} = 0.6089\mu\text{F}$$

4.- Impedancia Equivalente del Transformador Referida al Primario $Z_{T(HV)}$.

$$Z_{T(HV)} = \frac{V_{LL(HV)}^2}{MVA_{SC}}$$

$$MVA_{SC} = \frac{S_T}{U_{CC}\%}$$

Porque no se dispone de la potencia de cortocircuito en el primario.

$$\Rightarrow Z_{T(HV)} = \frac{(U_{CC}\%)(V_{LL(HV)})^2}{S_T}$$

donde:

$U_{CC}\%$: Impedancia de cortocircuito del transformador.
 S_T : Potencia aparente del transformador.

Potencia kVA	Perdidas (W)		$U_{CC}\%$
	P_o	P_{CCU}	
25 *	160	600	4.00
40	200	900	4.00
63	270	1350	4.00
80	315	1500	4.00
100	350	1750	4.00
125	420	2100	4.00
160	500	2500	4.00
200	600	3000	4.00
250	700	3500	4.00
315	850	4250	4.00
400	1000	5000	4.00
500	1200	6000	4.00
630	1450	7250	4.00
800	1750	8750	5.00
1000	2000	10500	5.00
1250	2300	13800	5.00
1600	2700	17000	6.00
2000	3000	21500	6.00
2500	3300	24800	6.00
3000	3750	2700	6.00

*REGULACION + 5%

TABLA 1.- Valores típicos de pérdidas en vacío (P_o); pérdidas de plena carga (P_{CCU}) e impedancias de cortocircuito ($U_{CC}\%$) para algunos transformadores a 13.2kV.

De la tabla 1, $U_{CC}\%=4\%$ para un transformador cercano a 75 kVA.

$$\Rightarrow Z_{T(HV)} = \frac{(0.04)(13.2\text{kV})^2}{75\text{kVA}} = 92.928\Omega$$

5.- Resistencia Equivalente del Transformador Referida al Primario $R_{T(HV)}$.

$$R_{T(HV)} = P_{CCU} \left[\frac{V_{LL(HV)}}{S_T} \right]^2$$

P_{CCU} : Pérdidas de cortocircuito (ver tabla 1); para un transformador cercano a 75KVA; $P_{CCU} = 1.5\text{kW}$.

$$\Rightarrow R_{T(HV)} = 1.5\text{kW} \left[\frac{13.2\text{kV}}{75\text{kVA}} \right]^2 = 46.464 \Omega$$

6.- Reactancia Equivalente del Transformador Referida al Primario $X_{LT(HV)}$ e Inductancia Resultante $L_{T(HV)}$.

$$X_{LT(HV)} = \sqrt{Z_{T(HV)}^2 - R_{T(HV)}^2}$$

$$= \sqrt{92.928\Omega^2 - 46.464\Omega^2} = 80.478\Omega$$

y

$$L_{T(HV)} = \frac{X_{LT(HV)}}{2\pi f_1}$$

$$= \frac{80.478\Omega}{377 \text{ rad/seg}} = 213.47\text{mH}$$

7.- Frecuencia de Resonancia Serie (F_R) del Circuito y Armónica de Sintonía Natural (h_R).

$$F_R = [2\pi\sqrt{L_{T(HV)} \cdot C_{HV}}]^{-1} \text{Hz}$$

$$\Rightarrow F_R = [2\pi\sqrt{(213.47\text{mH})(0.6089\mu\text{F})}]^{-1} \text{Hz.}$$

$$= 441.44\text{Hz}$$

y

$$h_R = \frac{F_R}{f_1} = \frac{441.44 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 7.35 \text{ armónica}$$

8.- Resistencia Equivalente Activa de la Carga Referida al Primario $R_{L(HV)}$; Factor de Calidad (Q_P); Ancho de Banda (BW) y Frecuencias de Potencia Mitad (f_1 y f_2).

- $R_{L(HV)} = \frac{V_{LL(HV)}^2}{P_T}$; donde
 P_T : Potencia activa total de la carga (kW).
- ✓ $R_{L(HV)} = \frac{13.2kV^2}{55.141kW} = 3.160k\Omega$
- ✓ $Q_P = [R_{T(HV)} + R_{L(HV)}] \sqrt{\frac{C_{(HV)}}{L_{T(HV)}}}$
 $= (46.464\Omega + 3.160k\Omega) \sqrt{\frac{0.6089\mu F}{213.47mH}} = 5.4$
- ✓ $BW = \frac{F_R}{Q_P} = \frac{441.44Hz}{5.4} = 81.75Hz$
- ✓ $f_1 \approx F_R + \frac{BW}{2}$ y $f_2 \approx F_R - \frac{BW}{2}$
 $\Rightarrow f_1 \approx 441.44 + \frac{81.75}{2} = 482.3 Hz$
y $f_2 \approx 441.44 - \frac{81.75}{2} = 400.56 Hz$

NOTA: El error de centrado es pequeño (+3Hz aproximadamente).

CONCLUSIÓN PRELIMINAR A 40 kVar:

- Se está compensando casi a factor unitario con 40 kVar @480V; a saber:

$$FP_{(FIN)} = \cos \left[\tan^{-1} \left[\tan \cos^{-1} FP_{(INIC)} - \frac{Q}{P} \left(\frac{U_T}{U_F} \right)^2 \right] \right]$$

NOTA: Ecuación para determinar el factor de potencia que se obtiene $FP_{(FIN)}$ a partir de un banco de capacitores conocido de potencia reactiva (Q en kVar) y conociendo el voltaje promedio de trabajo (U_T) y el voltaje de fábrica de los capacitores (U_F).

- $FP_{(FIN)} = \cos \left[\tan^{-1} \left[\tan \cos^{-1}(0.78) - \frac{40kVar}{55.14kW} \left(\frac{447V}{480V} \right)^2 \right] \right] = 0.985$

- Se está muy cerca de la 7ª armónica ($F_R=441.44Hz$) y caemos dentro del rango de acción dictaminado por las frecuencias de potencia mitad (400 Hz A 480 Hz aproximadamente) por lo que podemos decir *que se está sintonizando involuntariamente a la 7ª armónica.*
- Es una opción de compensación cara por estar casi al unitario ($Q_{REQ} \approx 44kVar$) y usar el capacitor más grande.
- Se recomienda explorar otras posibilidades de menor costo y desintonizar del filtro natural serie resultante.

15.- Replanteamiento de análisis.

- Comercialmente están disponibles bancos de capacitores además del de 40kVar; de 35 kVar y de 30kVar; esto da un giro interesante; es decir, se propone analizar con estos valores comerciales en lugar de valores teóricos.

- Re calculamos primero con 35kVar @480V y posteriormente a 30kVar similar a como se hizo con el banco anterior de 40kVar @480V.

16.- Factor de potencia con 35kVar; ($FP_{(FIN)}$).

- $FP_{(FIN)} = \cos \left[\tan^{-1} \left[\tan \cos^{-1}(0.78) - \frac{35kVar}{55.14kW} \left(\frac{447V}{480V} \right)^2 \right] \right] = 0.9697$

11.- Capacitancia equivalente de 35kVar referido al primario $C_{(HV)}$.

- $C_{(HV)} = \frac{35kVar}{377rad/seg \cdot 13.2kV^2} = 0.5328\mu F$

12.- Frecuencia de resonancia serie (F_R) del circuito y armónica de sintonía natural (h_R).

- $F_R = [2\pi\sqrt{(213.47mH)(0.5358\mu F)}]^{-1} = 470.6Hz$

- $h_R = \frac{470.6Hz}{60Hz} = 7.84 \text{ armónica}$

13.- Factor de calidad (Q_p); ancho de banda (BW) y frecuencia de potencia mitad (f_1 y f_2).

- $Q_p = (46.464\Omega + 3.16k\Omega) \sqrt{\frac{0.5328\mu F}{213.47mH}} = 5.06$

- $BW = \frac{470.6 Hz}{5.06} = 92.89 Hz$

- $f_1 = 470.6Hz + \frac{92.89Hz}{2} = 517Hz$

- $f_2 = 470.6Hz - \frac{92.89Hz}{2} = 424.1Hz$

CONCLUSIÓN PRELIMINAR A 35 kVar:

- Se compensa el factor de potencia al 97%.
- Es más económica esta opción que la anterior.
- La 7ª armónica esta en el limite inferior del ancho de banda ($\approx f_1 = 424 Hz$) pero todavía figura dentro del rango.

14.- Factor de potencia con 30kVar.

- $FP_{(FIN)} = \cos \left[\tan^{-1} \left[\tan \cos^{-1}(0.78) - \frac{30kVar}{55.14kW} \left(\frac{447}{780} \right)^2 \right] \right] = 0.9495$

15.- Capacitancia equivalente con 30kVar retirada al primario $C_{(HV)}$.

- $C_{(HV)} = \frac{30kVar}{377rad/seg \cdot 13.2kV^2} = 0.4567\mu F$

16.- Frecuencia de resonancia serie (F_R) del circuito y armónica de sintonía natural (h_R).

- $F_R = (2\pi\sqrt{213.47mH \cdot 0.4567\mu F})^{-1} Hz = 509.72Hz$

- $h_R = \frac{509.72Hz}{60Hz} = 8.49 \text{ armónica}$

17.- Factor de calidad (Q_p); ancho de banda (BW) y frecuencia de potencia mitad (f_1 y f_2).

- $Q_p = (46.464\Omega + 3.160k\Omega) \sqrt{\frac{0.4567\mu F}{213.47mH}} = 4.69$

- $BW = \frac{509.72Hz}{4.69} = 108.68Hz$

- $f_1 \approx 509.72Hz + \frac{108.68Hz}{2} = 564.06Hz$

- $f_2 \approx 509.72Hz - \frac{108.68Hz}{2} = 455.38Hz$

CONCLUSIÓN PRELIMINAR A 30 kVar:

- Se compensa el factor de potencia al 95%.
- Es la opción más económica.
- La 7ª armónica (420Hz) esta fuera del rango del ancho de banda (BW) y las frecuencias de potencia mitad ($f_1 = 564 Hz$ y $f_2 = 455 Hz$); desde el punto de vista armónica es la opción mas viable.

CONCLUSIÓN

- En este caso es más viable económica y armónicamente hablando; compensar con 30kVar a un $FP_{(FIN)}=95\%$ que con 35kVar a $FP_{(FIN)}=97\%$ o con 40kVar a $FP_{(FIN)}=98.5\%$; estos valores son comerciales y están disponibles pero con 30kVar, salimos de la influencia de la 7ª armónica (420Hz) que podría estar en la red. Además un banco de 30kVar es naturalmente más económico que los otros dos.
- Se observa que el cálculo debe realizarse con varias opciones para discernir la mejor.
- Una potencia finita de cortocircuito en el primario (observe que se está suponiendo en este artículo a esta potencia en el bus de 13.2 kV como infinita por ser desconocida); supongamos sea de 50 MVA_{SC} que es un valor estimado pero posible; este valor recorre uno 12Hz hacia la 7ª armónica el ancho de banda (BW) de los cálculos ya realizados ($F_R \approx 497 \text{ Hz}$ y $f_2 \approx 443 \text{ Hz}$) pero todavía queda fuera del alcance de 7ª armónica (420Hz); por eso es recomendable quedar lo más lejos posible de las armónicas 5ª y 7ª (300 Hz y 420Hz) porque variaciones de potencia de cortocircuito en la red (que sucede cuando se conectan a mas usuarios); pueden hacer que se sintonicen los circuitos compensados a estas frecuencias armónicas proliferándolas.