



BENEFICIOS DE LA CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA DE MANERA DISTRIBUIDA



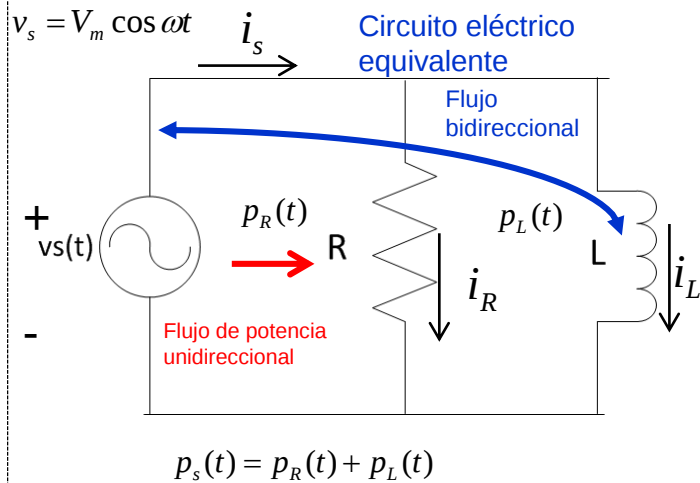
Jesús Antonio Baez Moreno

Monterrey, N.L.

Diciembre, 2020

CONTENIDO

- Definición de factor de potencia
- ¿Cómo afecta el factor de potencia en el desempeño de un sistema eléctrico?
- ¿Cuáles son los beneficios de la corrección del factor de potencia?
- Cálculo de la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.
- Efecto de la ubicación de los bancos de capacitores
- Caso de Estudio planta industrial
- Conclusiones
- Referencias



$$i_s = i_R + i_L$$

$$i_s = \sqrt{V_m^2 \left[\left(\frac{1}{R} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} \right)^2 \right]} \cos \left(\omega t - \tan^{-1} \frac{R}{\omega L} \right)$$

$$I_{sm} = \sqrt{V_m^2 \left[\left(\frac{1}{R} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} \right)^2 \right]}$$

Motor de inducción

$$P_{mec} = \eta(P)$$



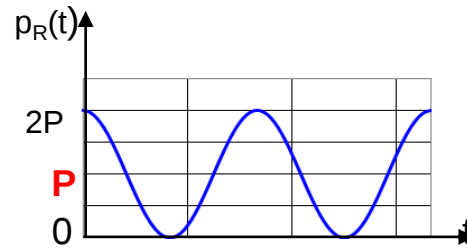
P: Potencia real, promedio o activa. Componente de la potencia que es convertida a otra forma útil de energía (mecánica, térmica, iluminación)

$$i_R = \frac{v_R}{R} = \frac{V_m}{R} \cos \omega t$$

Cálculo de potencia absorbida

$$p_R = v_R i_R = \frac{V_m^2}{R} \cos^2 \omega t = \frac{V_m^2}{2R} [1 + \cos 2\omega t] = P [1 + \cos 2\omega t]$$

$$0 \leq p_R(t) \leq 2P$$



$$i_L = \frac{V_m}{X_L} \cos(\omega t - 90^\circ)$$

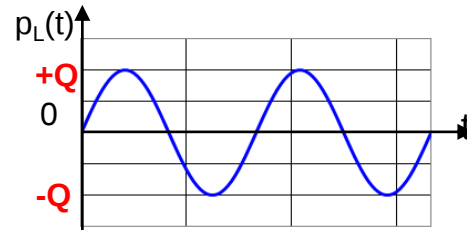
Reactancia Inductiva $X_L = \omega L [=] \Omega$

$$p_L = v_L i_L = V_m \cos \omega t \left[\frac{V_m}{X_L} \cos(\omega t - 90^\circ) \right]$$

$$p_L = \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{X_L} \cos(2\omega t - 90^\circ) = Q \sin(2\omega t)$$

$$-Q \leq p_L(t) \leq Q$$

Potencia Reactiva (Q)
Valor máxima de la potencia instantánea asociada a la inductancia y la fuente intercambian cada ciclo



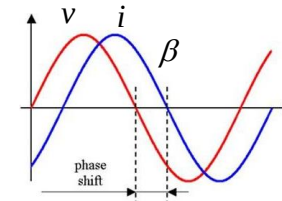
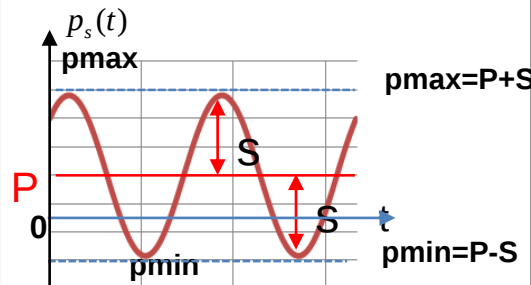
$$p_s(t) = p_R(t) + p_L(t)$$

$$p_s(t) = P [1 + \cos 2\omega t] + Q \sin(2\omega t)$$

$$p_s(t) = P + P \cos 2\omega t + Q \sin(2\omega t)$$

$$p_s(t) = P + \sqrt{P^2 + Q^2} \cos \left[2\omega t - \tan^{-1} \frac{Q}{P} \right]$$

$$p_s(t) = P + S \cos \left[2\omega t - \tan^{-1} \frac{R}{X_L} \right]$$



S(VA)

Q(VAr)

P(W)

$$\beta = \theta - \phi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$fp = \frac{P}{S} = \cos(\beta) = \cos(\theta - \phi)$$

P: Potencia promedio (real ó activa) (W)

Q: Potencia reactiva(VAr)

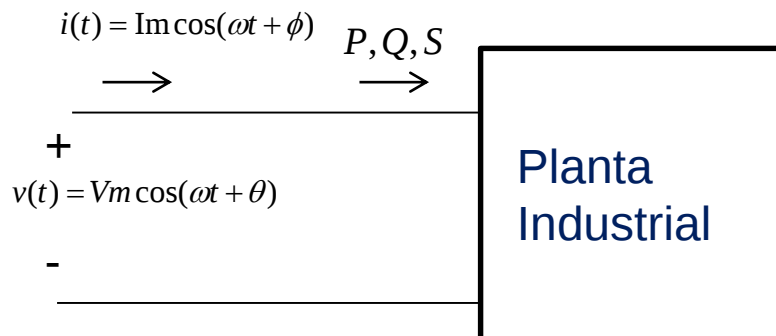
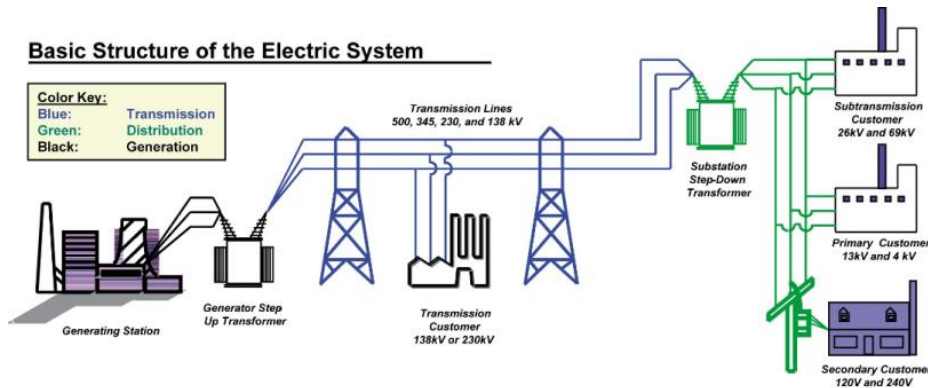
S: Potencia Aparente(VA)

fp: Factor de potencia

β : Ángulo del factor de potencia

Efecto del factor de potencia en desempeño del sistema

Basic Structure of the Electric System



$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta - \phi)$$

$$fp = \cos(\theta - \phi) = \frac{P}{S}$$

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m (fp) = V_{rms} I_{rms} (fp)$$

$$I_{rms} = \frac{P}{V_{rms}} \left[\frac{1}{fp} \right]$$

$$fp \downarrow \rightarrow I_{rms} \uparrow$$

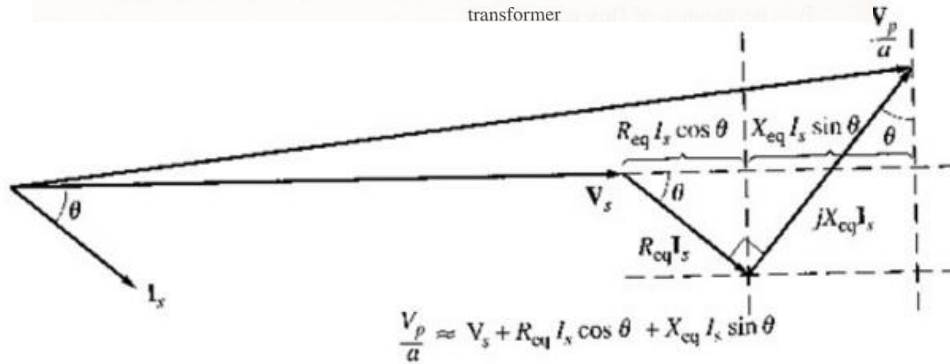
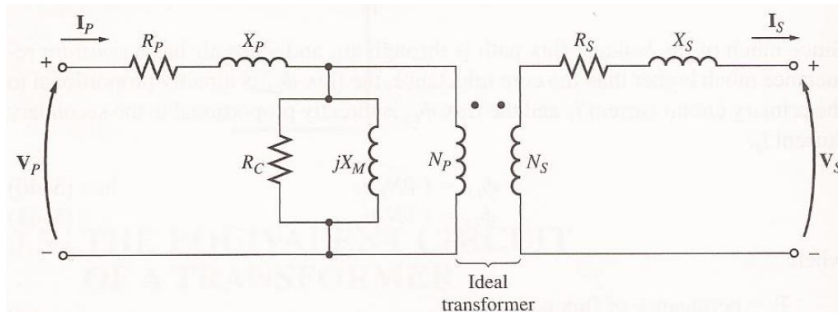
$I_{rms} \uparrow \rightarrow$ Mayor capacidad de todos los elementos del sistema eléctrico (generadores, transformadores, líneas)

$I_{rms} \uparrow \rightarrow$ Incremento en caída de voltaje $\uparrow$

$I_{rms} \uparrow \rightarrow$ Incremento en pérdidas de potencia $\uparrow$

Operación a un bajo factor de potencia afecta el desempeño de todo el sistema eléctrico

Efecto del factor de potencia en la regulación de voltaje



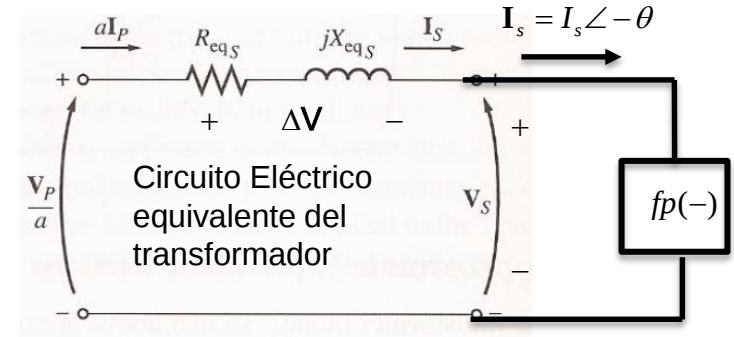
$$\frac{V_P}{a} = V_S + (R_{eqs})(I_s) + (jX_{eqs})(I_s)$$

$$\frac{V_P}{a} = V_S + (R_{eqs})(I_s) \cos \theta + (X_{eqs})(I_s) \sin \theta + j[(X_{eqs})(I_s) \sin \theta - (R_{eqs})(I_s) \cos \theta]$$

$$\left| \frac{V_P}{a} \right| = \sqrt{(V_S + (R_{eqs})(I_s) \cos \theta + (X_{eqs})(I_s) \sin \theta)^2 + [(X_{eqs})(I_s) \sin \theta - (R_{eqs})(I_s) \cos \theta]^2}$$

$$\left| \frac{V_P}{a} \right| \approx V_S + (R_{eqs})(I_s) \cos \theta + (X_{eqs})(I_s) \sin \theta$$

$$\left| \frac{V_P}{a} \right| \approx V_S + (R_{eqs})(I_s) \cos \theta + (X_{eqs})(I_s) \sin \theta$$



$$\text{Reg. Voltaje(\%)} = 100 \left[\frac{\text{Voltaje de Vacío} - \text{Voltaje en condiciones de carga}}{\text{Voltaje en condiciones de carga}} \right]$$

$$\text{Reg. Voltaje(\%)} = 100 \left[\frac{\left| \frac{V_P}{a} \right| - |V_S|}{|V_S|} \right]$$

$$\Delta V \approx (R_{eqs})(I_s) \cos \theta + (X_{eqs})(I_s) \sin \theta$$

$$\text{Reg. Voltaje(\%)} = 100 \left[\frac{\Delta V}{|V_S|} \right]$$

$$X \gg R$$

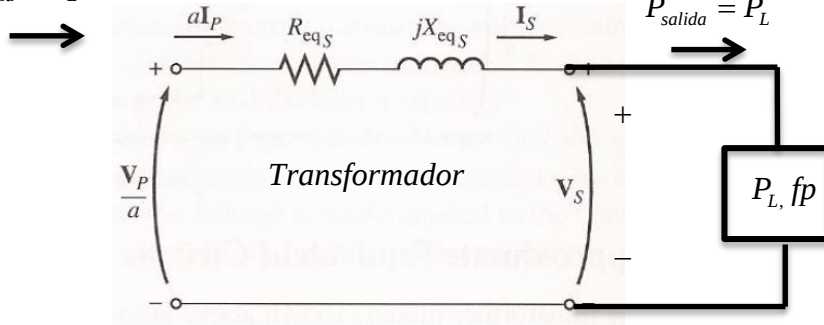
$$\Delta V \approx (X_{eqs})(I_s) \sin \theta$$

$$fp \downarrow \rightarrow \sin \theta \uparrow \rightarrow \Delta V \uparrow \rightarrow \text{Reg. Voltaje} \uparrow$$

Durante el arranque de motores a tensión plena, la magnitud de la corriente se incrementa considerablemente y el factor de potencia es muy bajo. Esto se traduce en un abatimiento del voltaje que puede afectar tanto el arranque del motor como al resto de las cargas.

Efecto del factor de potencia en la eficiencia de transformador

$$P_{\text{entrada}} = P_L + \Delta P$$



$$\Delta P_{\text{Núcleo}}$$

Typical Performance Data

High Voltage–15 kV Class, Low Voltage–600V Class

kVA	No Load Losses (Watts)	Full Load Losses (Watts)	Total Losses (Watts)	Efficiency					Maximum Efficiency
				112%	100%	75%	50%	25%	
75	450	985	1435	98.03	98.12	98.25	98.18	97.34	98.26 @67.69% Load
112	620	1,350	1970	98.19	98.27	98.38	98.32	97.55	98.39 @67.77% Load
150	775	2,430	3,205	97.77	97.91	98.13	98.19	97.59	98.20 @56.47% Load
225	800	3,280	4,085	98.09	98.22	98.46	98.58	98.24	98.63 @49.39% Load
300	975	4,120	5,095	98.20	98.33	98.56	98.68	98.38	98.68 @48.65% Load
500	1,330	5,550	6,880	98.64	98.64	98.83	98.92	98.68	98.92 @48.95% Load
750	1,840	9,300	11,040	98.43	98.55	98.77	98.91	98.73	98.91 @44.72% Load
1,000	2,000	12,025	14,025	98.60	98.62	98.84	99.01	98.91	99.03 @40.78% Load
1,500	2,880	15,700	18,580	98.67	98.78	98.97	99.10	98.98	99.11 @42.83% Load
2,000	3,550	21,750	25,300	98.64	98.75	98.96	99.11	99.03	99.13 @40.40% Load
2,500	4,400	23,750	28,150	98.79	98.89	99.06	98.18	99.07	99.19 @43.04% Load
3,000	5,385	28,450	33,835	98.79	98.88	99.06	99.17	99.05	99.18 @43.61% Load
3,750	7,700	34,850	42,550	98.79	98.88	99.04	99.13	98.96	99.13 @47.00% Load
5,000*	8,240	33,020	41,260	99.12	99.18	99.29	99.34	99.18	99.34 @49.95% Load

*5000 kVA is listed with 5 kV secondary.

$$\Delta P_{\text{Cobre@plena carga}}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{salida}} + \Delta P} = \frac{P_L}{P_L + \Delta P_{\text{núcleo}} + \Delta P_{\text{cobre}}}$$

$$\Delta P_{\text{cobre}} = [\Delta P_{\text{cobre@PC}}] [FC^2]$$

$$FC = \frac{S}{S_{\text{nom}}} = \frac{\left(\frac{P_L}{fp}\right)}{kVA_{\text{nom}}} = \frac{P_L}{kVA_{\text{nom}}} \left[\frac{1}{fp}\right]$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_L}{P_L + \Delta P_{\text{núcleo}} + [\Delta P_{\text{cobre@PC}}] \left\{ \left[\frac{P_L}{kVA_{\text{nom}}} \left[\frac{1}{fp} \right] \right]^2 \right\}}$$

$fp \downarrow \rightarrow \text{Eficiencia} \downarrow$

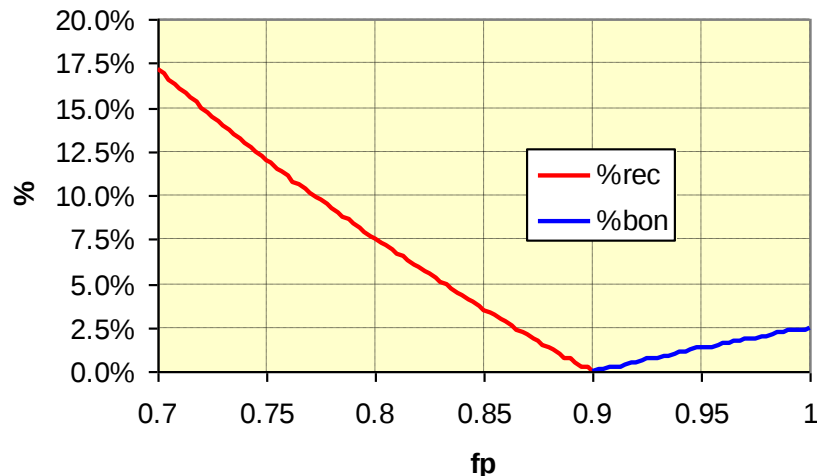
Ejemplo : Transformador de 2,500 kVA
alimentando una carga de 1,750 kW

fp	S (kVA)	Factor de Carga(FC)	Pérdidas de Cobre (kW)	Reducción de pérdidas (kW)	Reducción en pérdidas de energía anuales (kWh)
0.7	2,500	1.00	23.75		
0.8	2,188	0.88	18.18	5.57	43,886
0.9	1,944	0.78	14.37	9.38	73,973
1	1,750	0.70	11.64	12.11	95,495

Beneficios de Corregir Factor de Potencia

- Eliminación de multa por bajo factor de potencia
- Bonificación por parte de CFE ($fp > 0.9$)
- Recuperación de capacidad instalada de transformadores y cables.
- Reducción de pérdidas de potencia real (I^2R) y reactiva (I^2X).
Reducción de energía consumida y consecuentemente mayor eficiencia del sistema.
- Mejora en Regulación de Voltaje en estado estable y durante el arranque de los motores.
- En caso de contar con cargas no lineales, y utilizar filtros de armónicas debidamente sintonizados para la corrección de factor de potencia, se reduciría la distorsión armónica de corriente y voltaje, lo cual se traduce en un mayor factor de potencia de distorsión y total.

1. Penalización y Bonificación vs. Factor de potencia



$$\%Penalización = 60 \left[\frac{0.9}{pf} - 1 \right]; pf < 0.9$$

$$\%Bonificación = 25 \left[1 - \frac{0.9}{pf} \right]; pf > 0.9$$

Factor de potencia original < 0.9

Factor de potencia corregido $fp' > 0.9$

$$FPfp = \frac{3}{5} \left[\frac{0.9}{fp} - 1 \right]$$

$$FBfp = \frac{1}{4} \left[1 - \frac{0.9}{fp'} \right]$$

Efecto neto en facturación

$$\Delta Facturación = TFSB(FPfp + FBfp)$$

TFSB : Tarifa Final de Suministro Básico

$$TFSB = CF + CE + CC + CD$$

Ejemplo

Edificio comercial en tarifa GDMTH

$$TFSB = (FC + EC + CC + DC) = \$1'000,000$$

$$fp = 0.8 \rightarrow FPfp = \frac{3}{5} \left[\frac{0.9}{0.8} - 1 \right] = 0.075$$

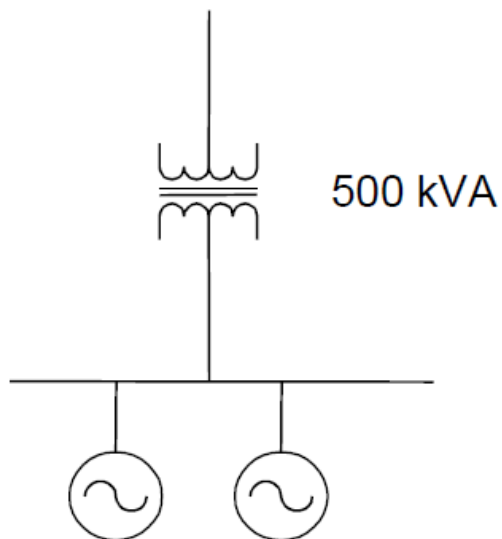
$$fp' = 0.95 \rightarrow FBfp = \frac{1}{4} \left[1 - \frac{0.9}{0.95} \right] = 0.013$$

Efecto Neto en Facturación

$$\Delta Facturación = TFSB(FPfp + FBfp) = 1'000,000(0.075 + 0.013) = \$88,000$$

2. Recuperación de capacidad instalada

$$\Delta S(\%) = 100 \left[1 - \frac{fp}{fp'} \right]$$



400kW, $fp = 0.8(-) \rightarrow S_T = S_{Tnom} = 500kVA$

Transformador opera al 100%

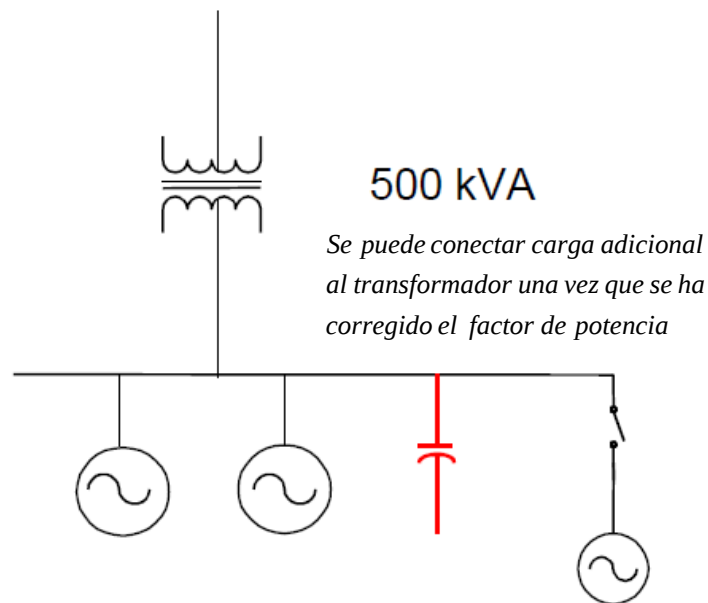
de su capacidad nominal(500kVA)

NO es posible alimentar más cargas

$\Delta S(\%)$: Recuperación de capacidad instalada que resulta de la corrección del factor de potencia

fp : Factor de potencia original

fp' : Factor de potencia corregido

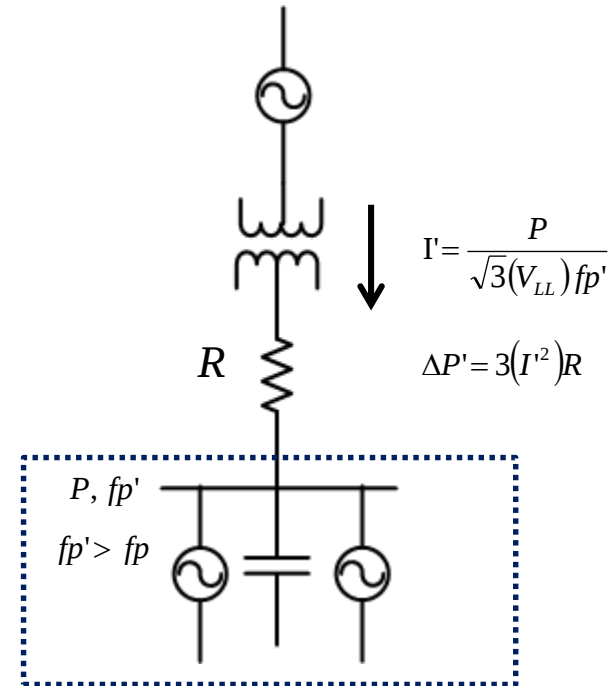
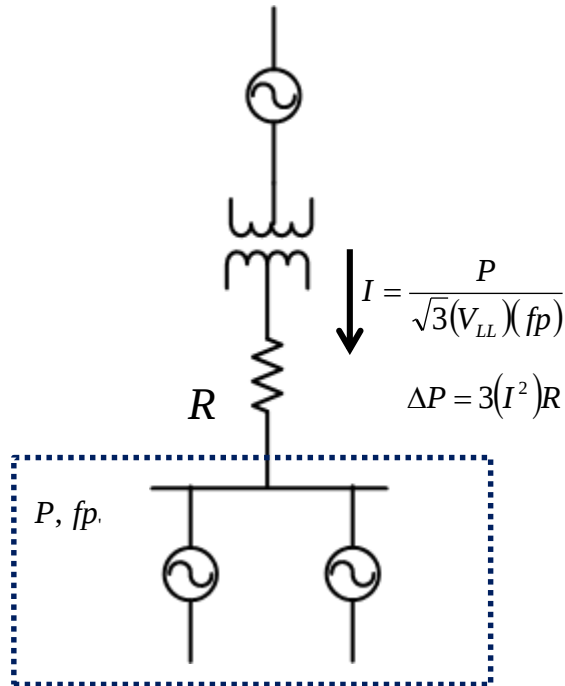


400kW, $fp = 1 \rightarrow S_T = 400kVA$

Transformador opera al 80% de su capacidad nominal(500kVA)

Es posible alimentar cargas adicionales con este transformador

3. Reducción de pérdidas en el sistema de distribución



$$d\Delta P = \Delta P - \Delta P' = 3(I^2 - I'^2)R$$

$$I' = I \left[\frac{fp}{fp'} \right]$$

$$d\Delta P = 3 \left(I^2 - I \left[\frac{fp}{fp'} \right]^2 \right) R$$

$$\frac{d\Delta P}{\Delta P} = \frac{3 \left(I^2 - I \left[\frac{fp}{fp'} \right]^2 \right) R}{3(I^2)R}$$

$$\frac{d\Delta P}{\Delta P} = 1 - \left(\frac{fp}{fp'} \right)^2$$

Ejemplo

$$R = 0.01\Omega$$

Previo a la corrección

$$fp = 0.8; I \approx 1000A$$

$$\Delta P = 3(1000^2)(0.01) = 30kW$$

Posterior a la corrección

$$fp' = 1; I' = 800A$$

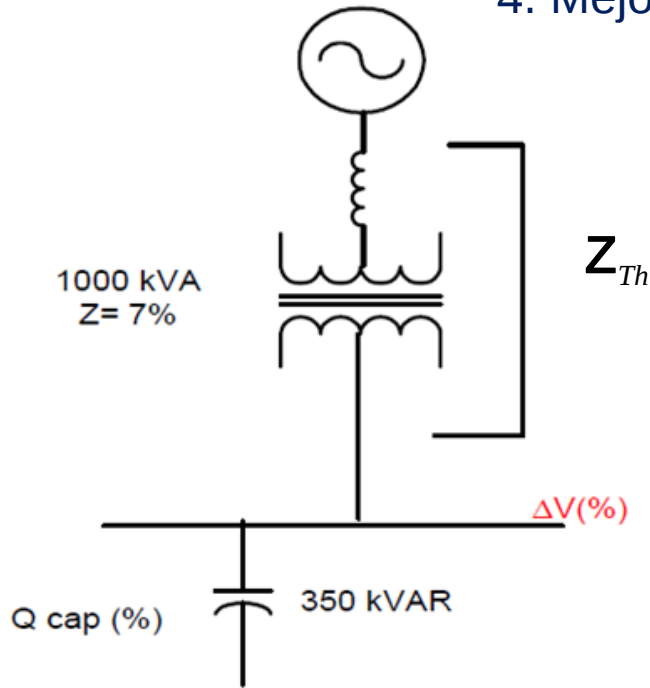
$$\Delta P' = 3(800^2)(0.01) = 19.2kW$$

$$d\Delta P = 10.8kW$$

$$\frac{d\Delta P}{\Delta P} = 1 - \left(\frac{0.8}{1} \right)^2 = 0.36 = 36\%$$

$$\frac{d\Delta P}{\Delta P} = \frac{10.8}{30} = 0.36 = 36\%$$

4. Mejora en la regulación de voltaje



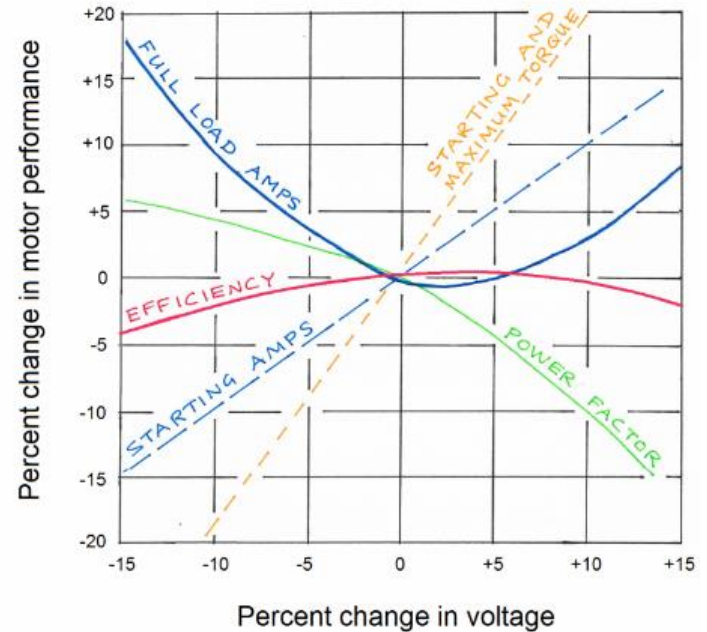
$\Delta V(\%)$: Porcentaje de Incremento en el voltaje que resulta de la conexión del banco de capacitores

$$\Delta V(\%) \approx \left(\frac{Q_{cap}}{S_{Tnom}} \right) [Z_{Th}(\%)]$$

$$S_{Tnom} = 1,000 \text{ kVA}; Z_T = 7\%; Q_{cap} = 350 \text{ kVAR}$$

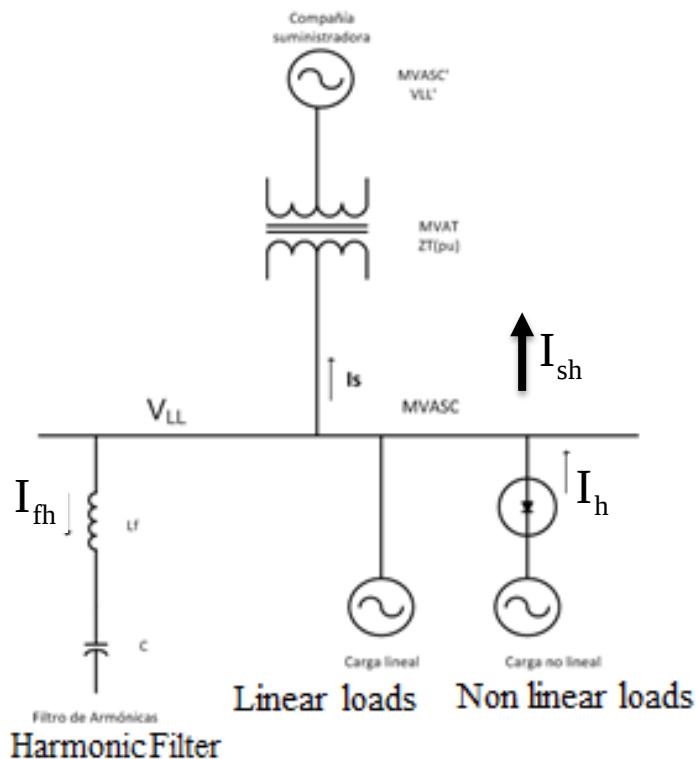
$$\Delta V(\%) \approx \left(\frac{350}{1000} \right) [7] \approx 2.5\%$$

Efecto de voltaje en desempeño de motores



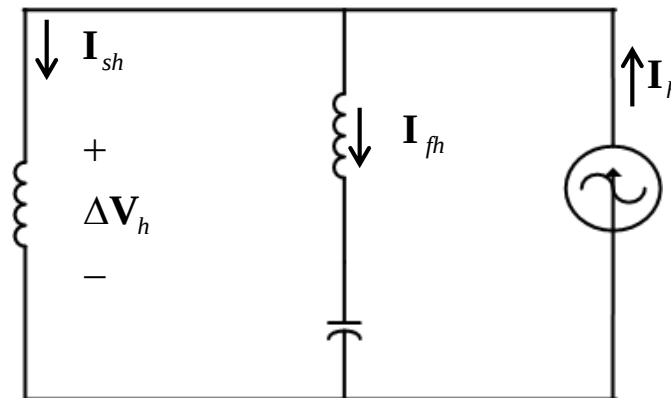
Reduced voltage is associated with *reduced* efficiency. The reason is that to deliver the same output at lower voltage, the motor will need to draw a higher current, and that increases its resistive losses.

Disminución de la distorsión armónica total de corriente y voltaje



$$Y_{sh} = \frac{1}{Z_{sh}} = -j \left(\frac{1}{hX_{sc}} \right) = -j \left(\frac{1}{hX_{Th}} \right)$$

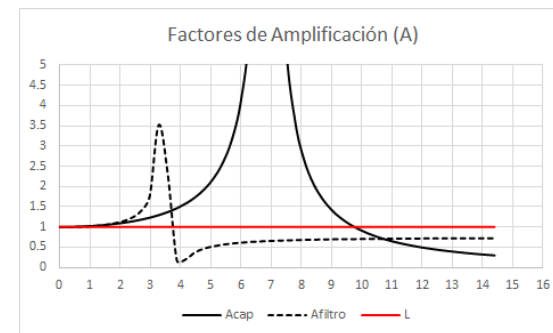
$$Y_{fh} = \frac{1}{Z_f} = -j \left[\frac{h h_s^2}{(h^2 - h_s^2) X_C} \right]$$



$$I_{sh} = [I_h] \left[\frac{Y_s(h)}{Y_F(h) + Y_s(h)} \right]$$

$$I_{sh} = [I_h] [A_h]$$

$$\Delta V_{sh} = [Z_s(h)] [I_{sh}]$$



$$THD_I = \frac{I_{rmsarm}}{I_{rms1}} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_{hmax}^2}}{I_1}$$

$$THD_V = \frac{V_{rmsarm}}{V_{rms1}} = \frac{\sqrt{\Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \Delta V_4^2 + \Delta V_5^2 + \dots + \Delta V_{hmax}^2}}{V_{rms1}}$$

$$Q_F = P_L [\tan(\beta) - \tan(\beta')]]$$

$$Q_F = P_L [\tan(\cos^{-1} pf_{disp}) - \tan(\cos^{-1} pf_{disp}')]]$$

$$X_C = \frac{V_{rms}^2}{Q_F}$$

$$pf_{disp} = \frac{P_L}{\sqrt{P_{L2} + (Q_L - Q_F)^2}}$$

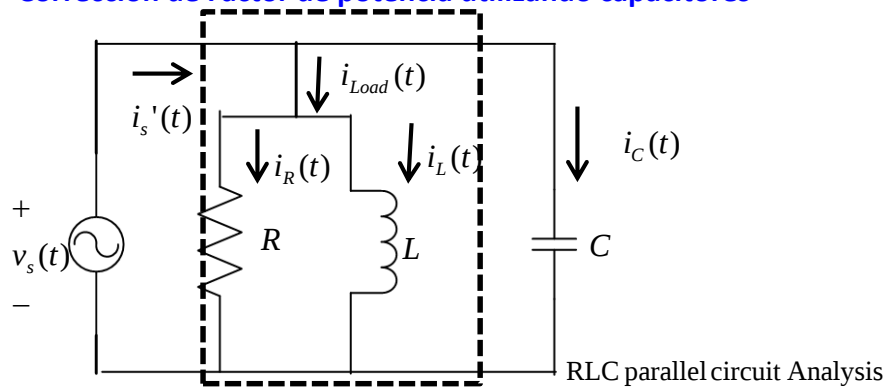
$$pf = (pf_{disp}) (pf_{dist})$$

$$(pf_{disp}) \uparrow (pf_{dist}) \uparrow \rightarrow pf \uparrow$$

$$I_{shrms} \downarrow \rightarrow THD \downarrow \rightarrow pf_{dist} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \uparrow$$

Cálculo de la Potencia Reactiva Necesaria para corregir el factor de potencia

Corrección de Factor de potencia utilizando capacitores



$$v_s(t) = V_m \cos(\omega t)$$

$$i_s'(t) = I_{sm}' \cos(\omega t + \phi_s')$$

$$I_{sm}' = \sqrt{\left(\frac{V_m}{R}\right)^2 + \left(\frac{V_m}{X_L} - \frac{V_m}{X_C}\right)^2} = V_m \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}$$

$$\phi_s' = -\tan^{-1} \left[R \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) \right]$$

$$pf_s' = \cos(\phi_s')$$

If $X_C > X_L \rightarrow \phi_s' < 0 \rightarrow i_s'(t)$ lags $v_s(t) \rightarrow$ lagging pf

If $X_C = X_L \rightarrow \phi_s' = 0 \rightarrow i_s'(t)$ in phase with $v_s(t)$ (OPTIMAL!)

If $X_C < X_L \rightarrow \phi_s' > 0 \rightarrow i_s'(t)$ leads $v_s(t) \rightarrow$ leading pf

$$X_C \rightarrow X_L \rightarrow \phi_s' \rightarrow 0 \rightarrow pf_s' \rightarrow 1$$

Effect of compensation on Source current

w/o compensation

$$I_{sm} = \frac{V_m}{R \sqrt{(R)^2 + (X_L)^2}}$$

Optimal compensation : $X_{Copt} = X_L$

$$I_{smopt}' = \frac{V_m}{R}$$

$$\frac{I_{smopt}'}{I_{sm}} = \frac{\frac{V_m}{R}}{\frac{V_m}{R \sqrt{(R)^2 + (X_L)^2}}} = \frac{X_L}{\sqrt{(R)^2 + (X_L)^2}}$$

$$\cos \phi_s = \frac{X_L}{\sqrt{(R)^2 + (X_L)^2}}$$

$$\frac{I_{smopt}'}{I_{sm}} = \cos \phi_s = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{R}{X_L} \right) \right] = pf_s$$

ϕ_s : Angle by which $i_s(t)$ lags $v_s(t)$ without capacitors

Reduction in Source current Amplitude(%) = $100(1 - \cos \phi_s) = 100(1 - pf_s)$

The higher the phase shift, ϕ_s , (before connecting capacitors),

the higher the reduction in source current amplitude that may

be achieved with capacitors.

Source Current **LAGS** voltage by an

angle equal to $\tan^{-1} \left[R \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) \right]$

Note that depending on the relative

value of X_C with respect to X_L ,

this angle may be positive ($X_C > X_L$),

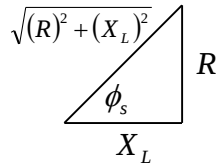
zero ($X_C = X_L$) or negative ($X_C < X_L$).

When pf is corrected, the resulting pf

is lagging but greater than 0.9, which means

current lags voltage by an angle below 25.84° .

This condition is achieved for values of X_C greater than X_L ($X_C > X_L$)



Definitions

V_m : Voltage maximum value(amplitude)

ω : Angular Frequency(r/s); t : time(s)

R_s, L_s : Resistance and inductance connected in series

R, L : Resistance and inductance connected in parallel

$X_s = \omega L_s$: Reactance of the series connected inductance

$X_L = \omega L$: Reactance of the parallel connected inductance

$X_C = \frac{1}{\omega C}$: Reactance of the parallel connected Capacitance

RL series

$i(t)$ = System's current ($i_s = i_{R_s} = i_{L_s} = i$)

I_m : Source Current maximum value(amplitude)

ϕ : Source Current Phase Angle(degrees)

RL parallel before compensation ($i_s = i_{Load} = i_R + i_L$)

$i_s(t)$ = Source current

I_{sm} : Source Current maximum value(amplitude)

ϕ_s : Source Current Phase Angle(degrees)

pf_s : Source power factor; $0 \leq pf_s \leq 1$

RLC Parallel after compensation ($i_s' = i_{Load} + i_C = i_R + i_L + i_C$)

$i_s'(t)$ = Source current

I_{sm}' : Source Current maximum value(amplitude)

ϕ_s' : Source Current Phase Angle(degrees)

pf_s' : Source power factor;

$pf_s' = \cos(\phi_s')$; $0 \leq pf_s' \leq 1$; $pf_s' \geq 0.9$ to avoid penalization

I_{smopt}' : Lowest possible source current amplitude

c) Calculation of capacitor required

to achieve source power factor = pf_s' (lagging)

Since voltage phase angle is zero, and target power

factor (pf_s') is lagging, current lags voltage. This

results in a negative phase angle for current

$$\phi_s' = -\tan^{-1} \left[R \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) \right] = -\cos^{-1}(pf_s')$$

$$\tan^{-1} \left[R \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) \right] = \cos^{-1}(pf_s')$$

$$\tan \left\{ \tan^{-1} \left[R \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) \right] \right\} = \tan[\cos^{-1}(pf_s')]$$

$$R \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) = \tan[\cos^{-1}(pf_s')]$$

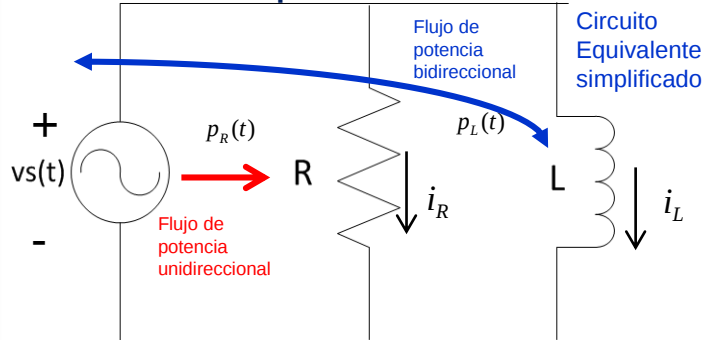
$$\left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) = \frac{\tan[\cos^{-1}(pf_s')]}{R}$$

$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_L} - \frac{\tan[\cos^{-1}(pf_s')]}{R}$$

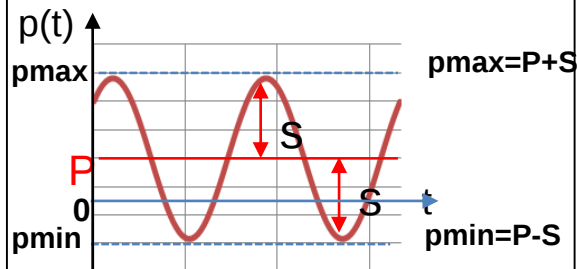
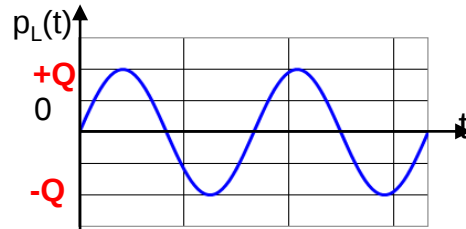
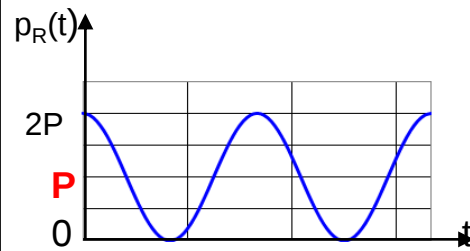
$$X_C = \frac{1}{\frac{1}{X_L} - \frac{\tan[\cos^{-1}(pf_s')]}{R}}$$

Corrección de Factor de potencia utilizando capacitores

Sin Capacitores



Sin el banco de capacitores, el elemento inductivo intercambia energía con la fuente.



Con capacitores(fp=1)

If $X_L = X_C$

$$p_{Cabs}(t) = -p_{Labs}(t)$$

$$p_{Cprod}(t) = p_{Labs}(t)$$

$$Q_{Cprod} = Q_{Labs}$$

$$p_s(t) = p_R(t)$$

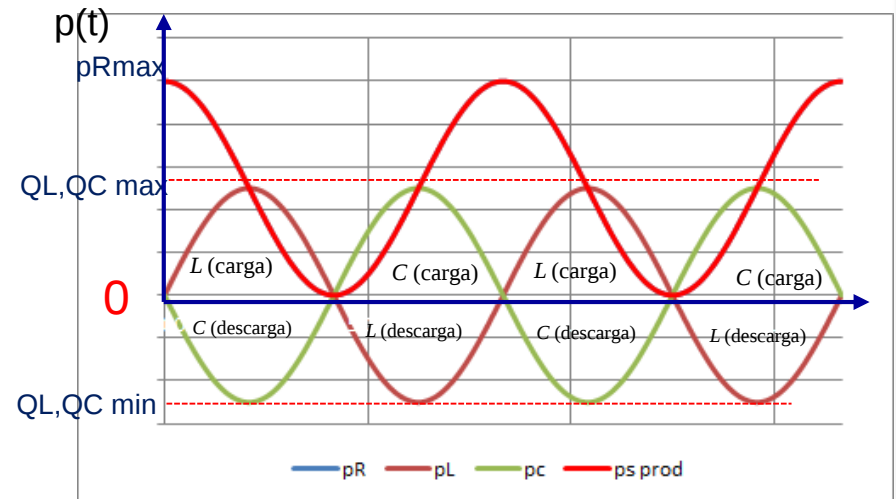
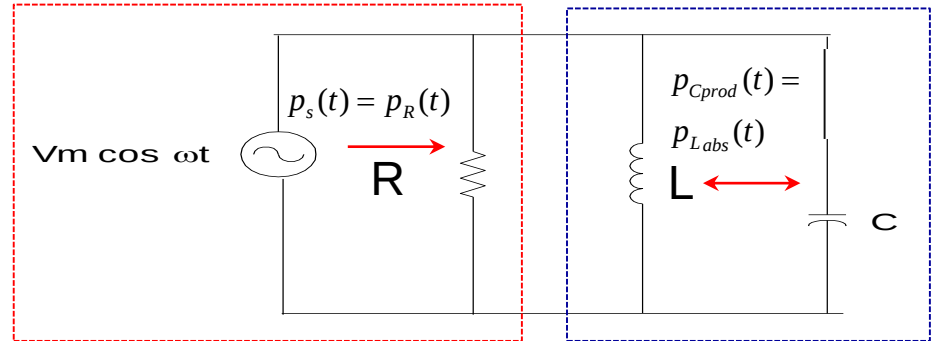
$$P_s = P_R$$

$$Q_{Cprod} = Q_{Labs}$$

$$Q_s = 0$$

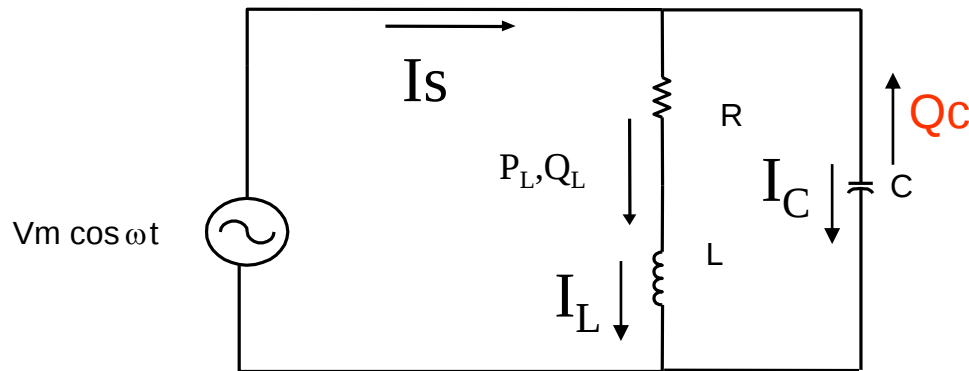
$$S_s = S_R = P_R$$

$$fp = 1.0$$

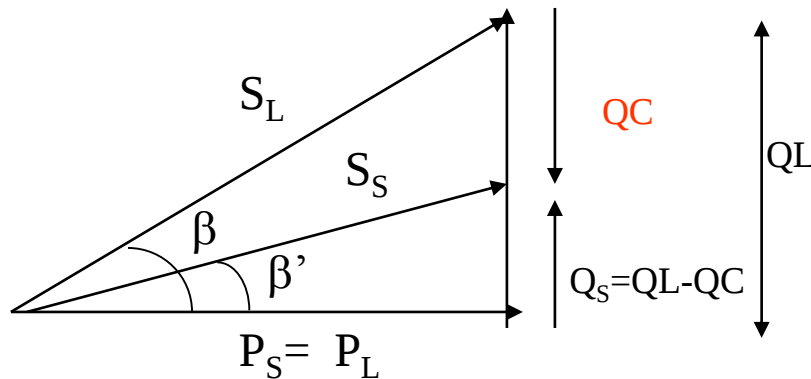


Si

Calculation of capacitor bank reactive power to improve power factor based on original power factor(pf) and real power (P_L)



Notes: Load consumption remains **Unchanged** when capacitor is connected
Source Real power **is not** **(significantly) affected** when Capacitor is connected.



$$Q_C = P_L [\tan(\beta) - \tan(\beta')] = P_L \left[\tan(\cos^{-1} pf) - \tan(\cos^{-1} pf') \right]$$

Without capacitors connected

$$S_s = S_L \Rightarrow |I_s| = |I_L|$$

With capacitor connected

$$S_s < S_L \Rightarrow |I_s| < |I_L|$$

P_L, Q_L, S_L : Load Real(kW), Reactive(kVAr) and apparent power (kVA)

P_S, Q_S, S_S : Source(Utility) Real(kW), Reactive(kVAr) and apparent power (kVA)

Q_C : Reactive power delivered by capacitor bank (kVAr)

pf : Original power factor, β : Original power factor angle

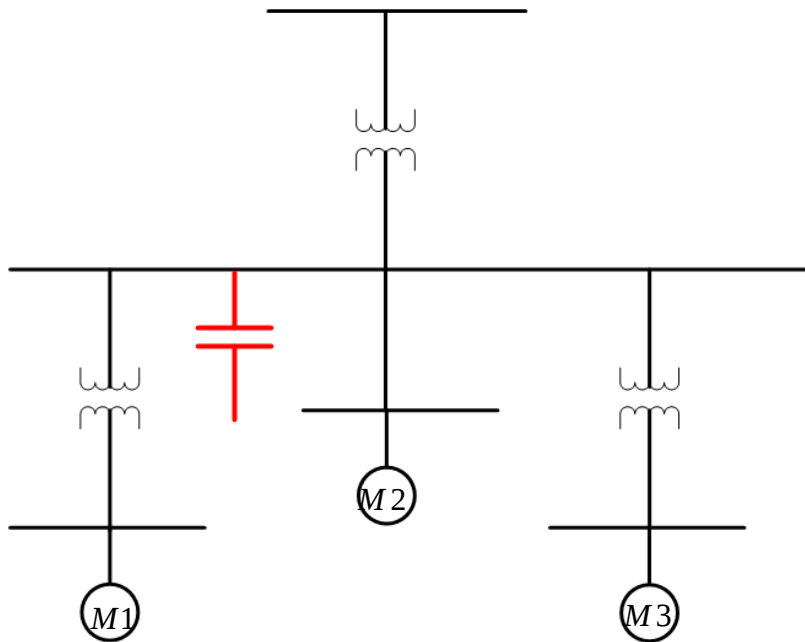
pf' : Improved(target) or proposed power factor, β' : Improved power factor angle

I_S, I_L, I_C : Source, load and capacitor current phasor (magnitud and phase angle)

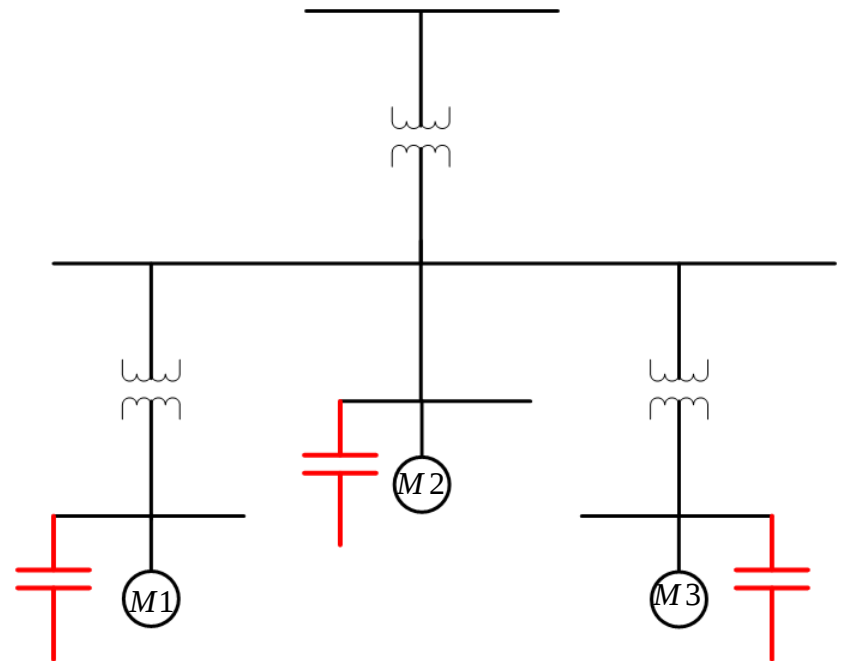
Efecto de la ubicación de los bancos de capacitores

Compensación Centralizada vs. Compensación distribuida

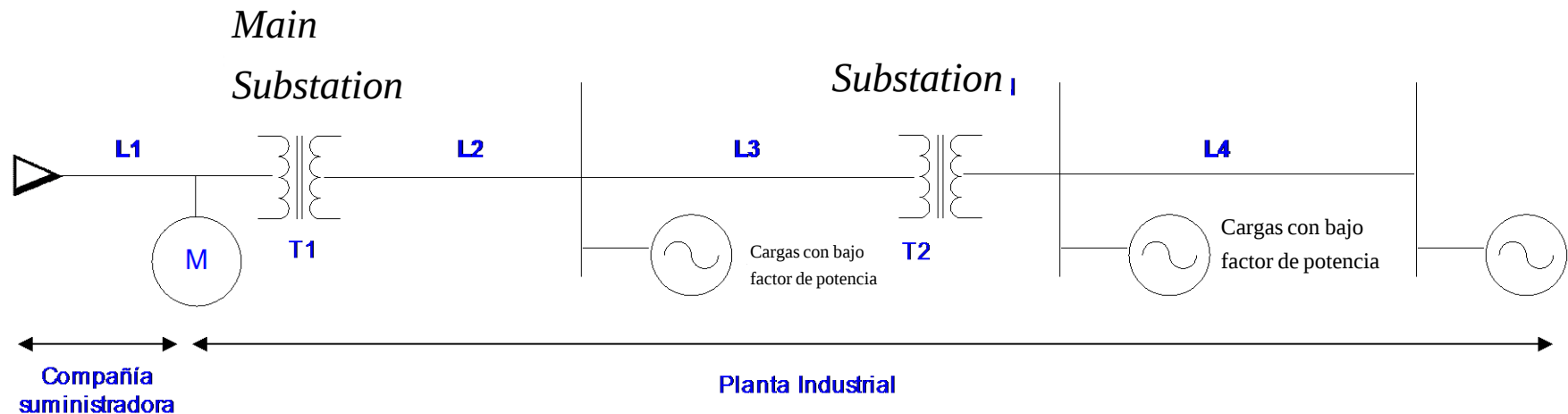
Compensación Centralizada



Compensación Distribuida



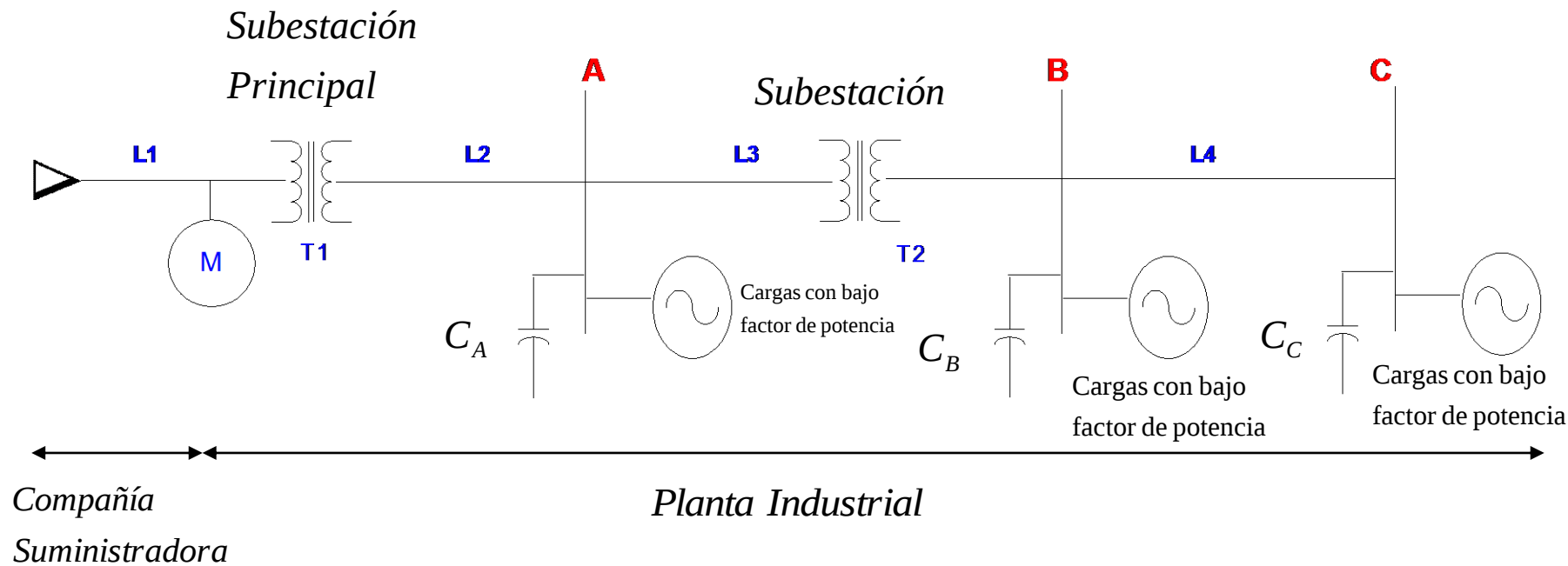
Efecto del factor de potencia en el desempeño del sistema eléctrico



Efecto del bajo factor de potencia en el sistema eléctrico

- Penalización
- Incremento en la corriente de los elementos del sistema eléctrico
- No adecuada utilización de la capacidad instalada
- Incremento de pérdidas de distribución (menor eficiencia)
- Problemas de regulación de voltaje

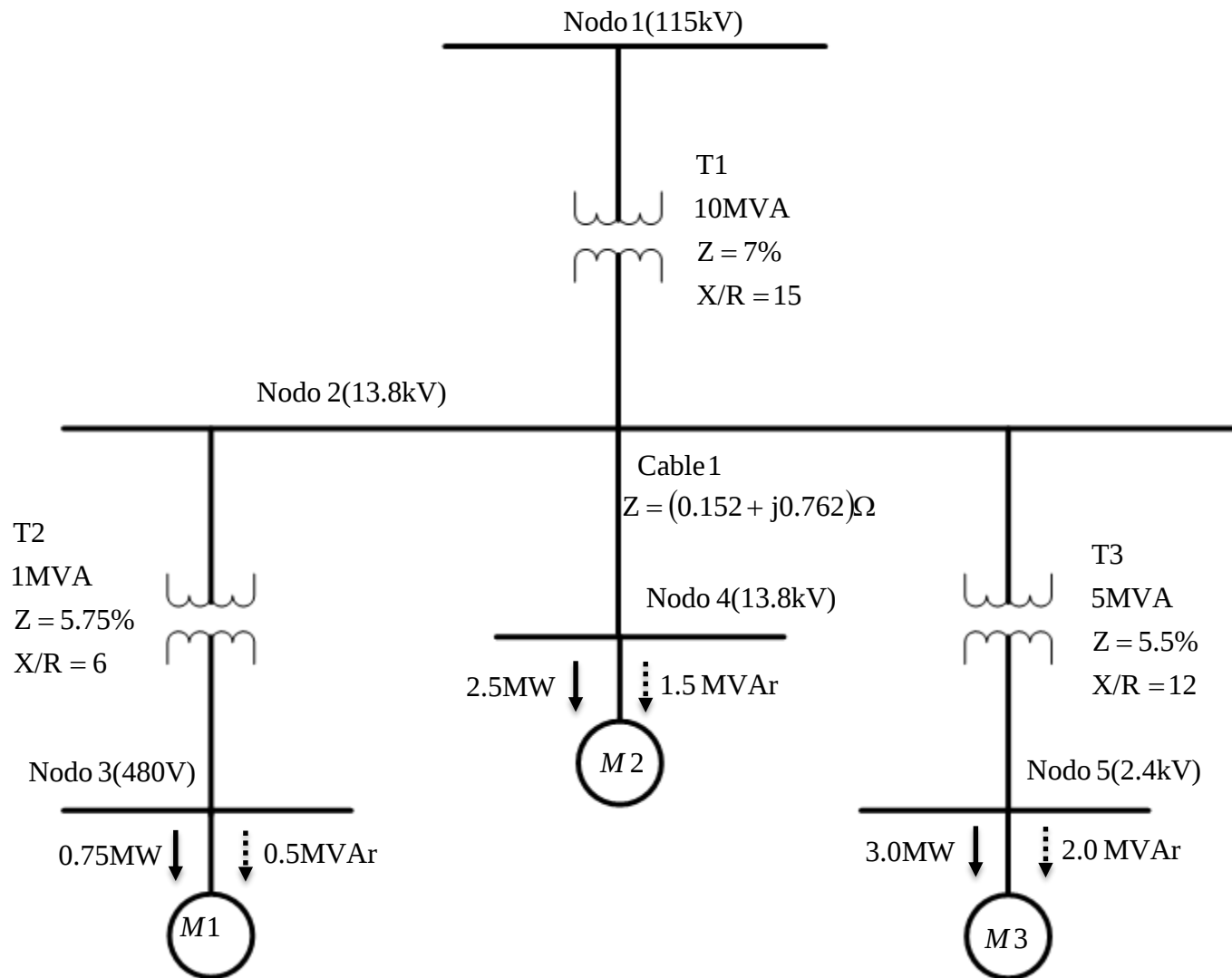
Efecto de la ubicación de los bancos de capacitores en el desempeño del sistema



Ubicación de Capacitores	Reducción de Penalización / Bonificación	Reducción de Pérdidas de potencia y caída de voltaje en L1	Recuperación de Capacidad Instalada de T1	Reducción de Pérdidas de potencia y caída de voltaje en L2	Reducción de Pérdidas de potencia y caída de voltaje en L3	Recuperación de Capacidad Instalada de T2	Reducción de Pérdidas de potencia y caída de voltaje en L4
A							
B							
C							

Caso de estudio

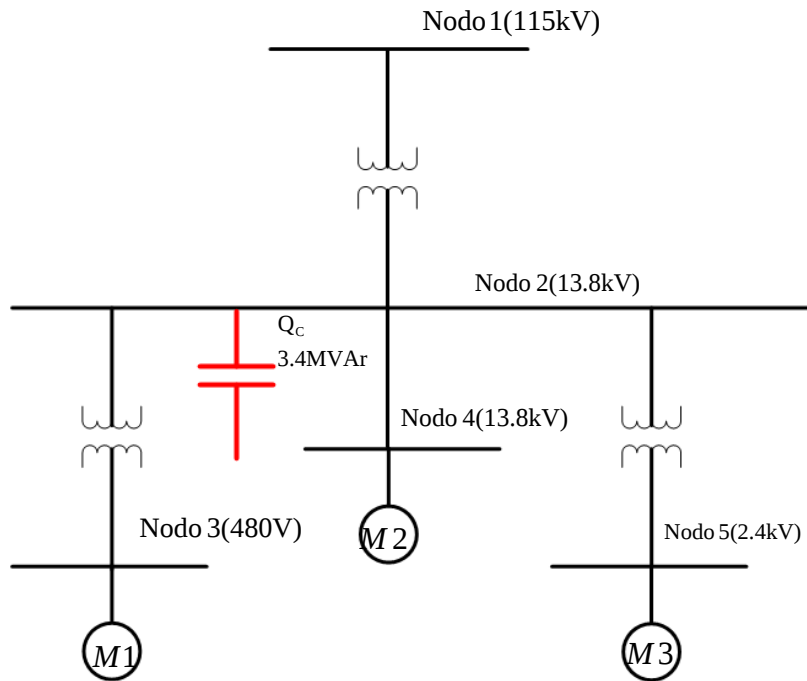
Corrección de factor de potencia en planta industrial



Valores entre paréntesis corresponden a voltajes nominales

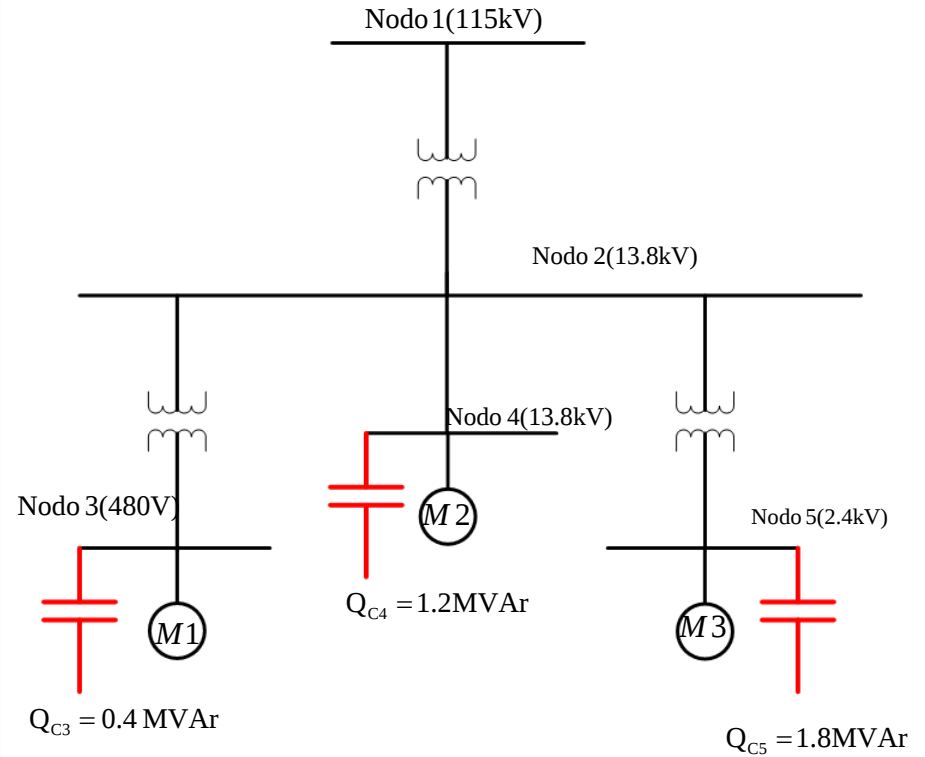
Compensación Centralizada

$$Q_{\text{Ctotal}} = Q_{C2} = 3.4\text{MVAr}$$



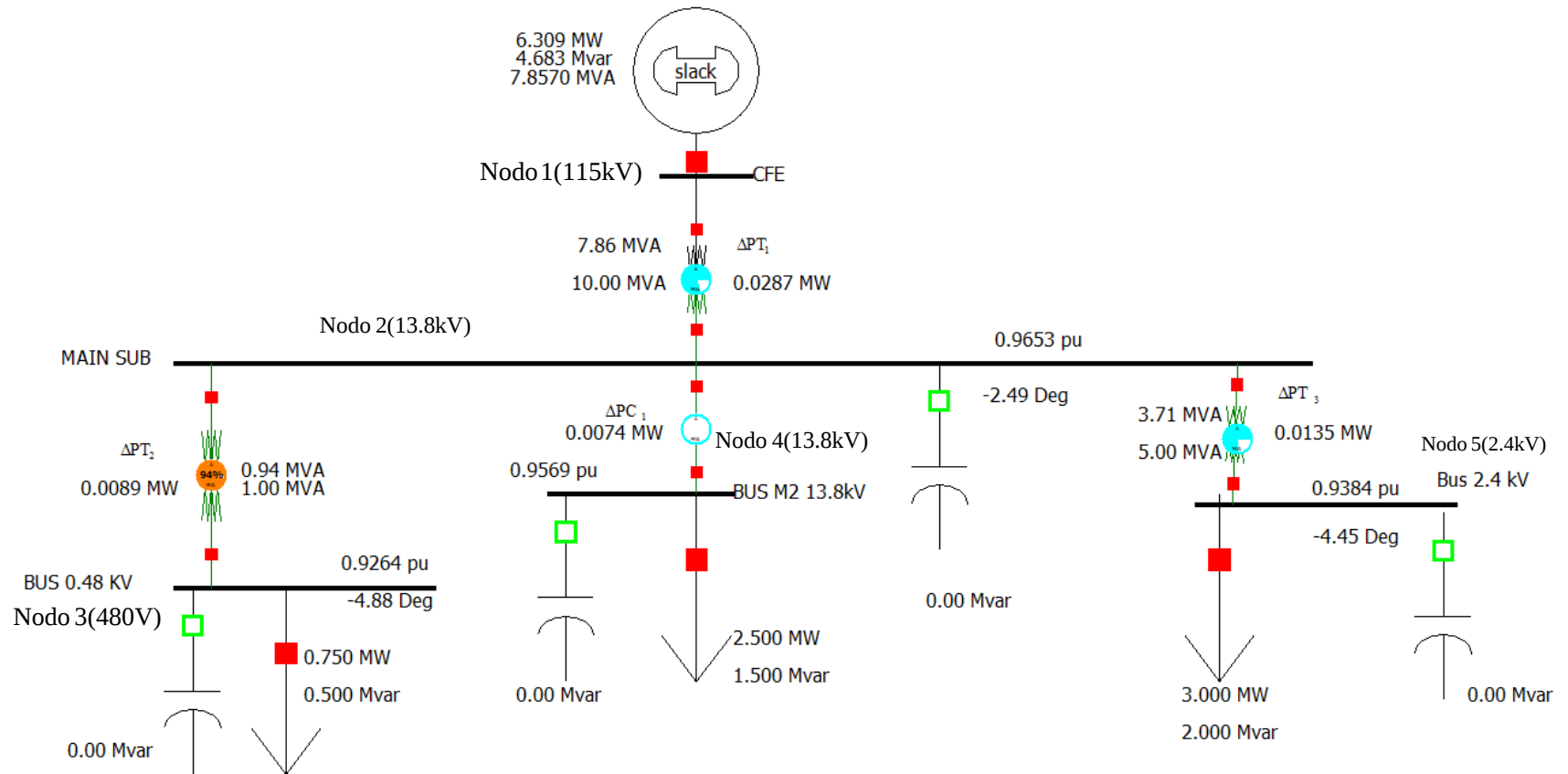
Compensación Distribuida

$$Q_{\text{Ctotal}} = Q_{C3} + Q_{C4} + Q_{C5} = 3.4\text{MVAr}$$



Simulación del sistema en Powerworld

Previo a corrección de factor de potencia

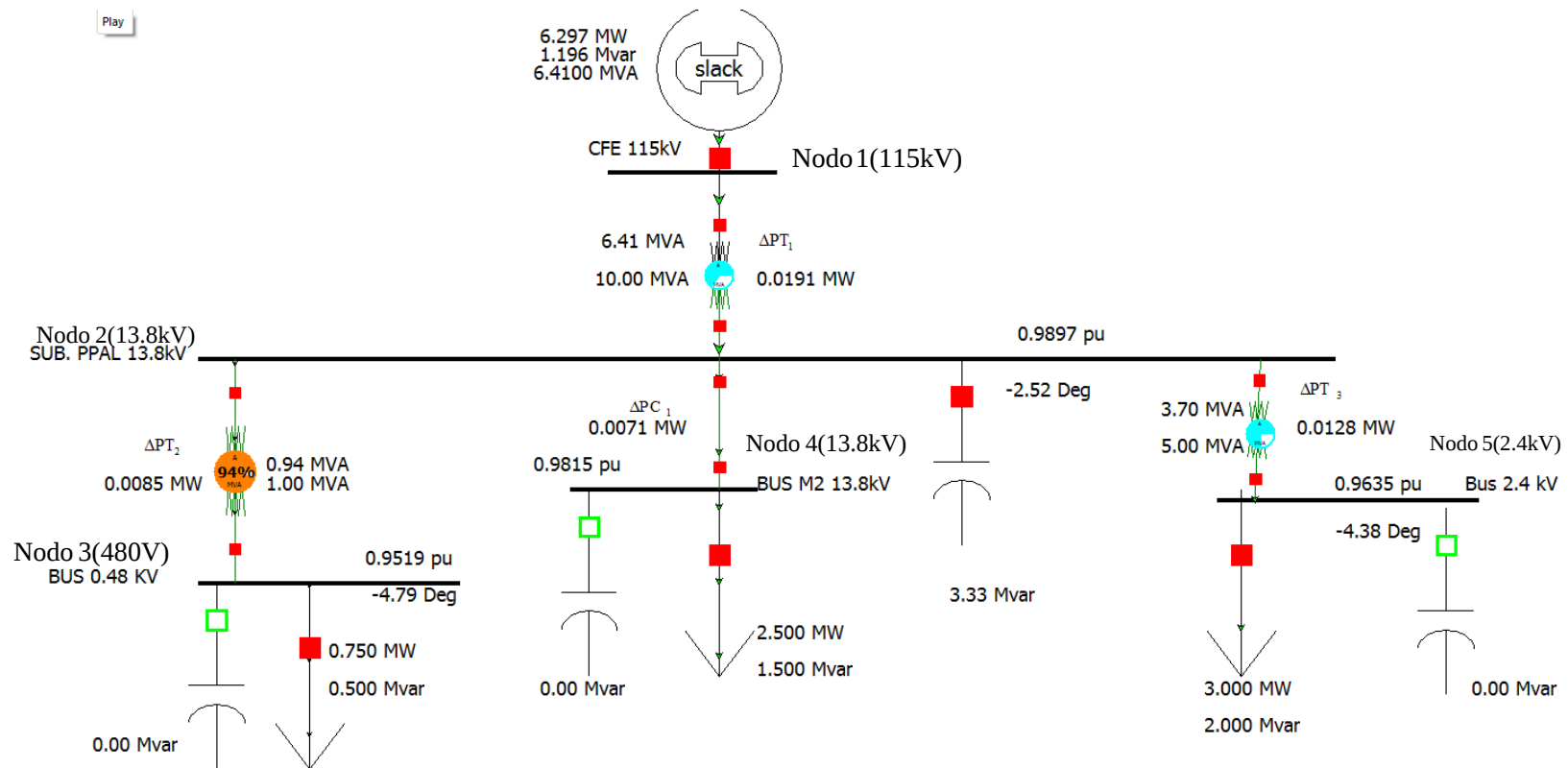


Valores de ΔP corresponden a las
pérdidas de potencia en los elementos

Simulación del sistema en Powerworld

Corrección de factor de potencia centralizada

Banco de 3.4 MVar nominales conectado en nodo 2

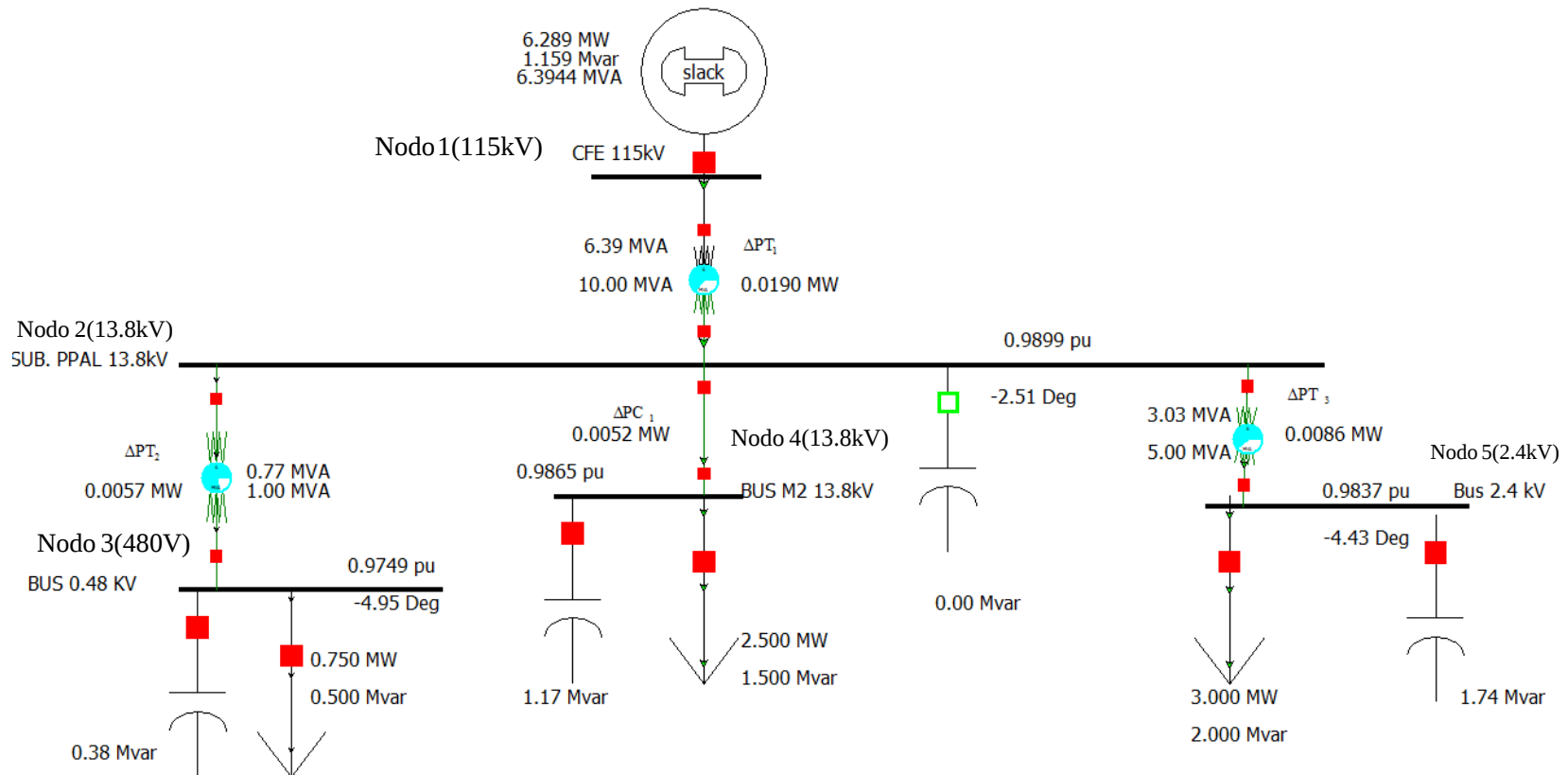


Valores de ΔP corresponden a las pérdidas de potencia en los elementos

Simulación del sistema en Powerworld

Corrección de factor de potencia distribuida

Bancos de capacitores (total de 3.5 MVar) conectados en nodos 3,4 y 5



Valores de ΔP corresponden a las pérdidas de potencia en los elementos

Resumen de Escenarios Analizados

Efecto en Facturación, pérdidas y Eficiencia			
	Sin compensación	Compensación Centralizada (Banco de capacitores de 3.4 MVAR en nodo 2)	Compensación distribuida. 3.4 MVAR distribuidos en nodos 3,4 y 5
Factor de potencia	0.8030	0.9824	0.9834
Factor de Penalización (%)	7.20%	0.00%	0.00%
Factor Bonificación(%)	0.00%	2.10%	2.10%
Beneficio en la facturación(%)	0.00%	9.30%	9.30%
Pérdidas de potencia(kW)	59	47	39
Eficiencia	99.06%	99.25%	99.38%
Pérdidas de Energía Anuales(kWh)	516,840	411,720	341,640
Reducción de Pérdidas de Energía (kWh)		105,120	175,200
Efecto en magnitud de voltajes de los nodos (por unidad)			
Nodo	Sin compensación	Compensación Centralizada (Banco de capacitores de 3.4 MVAR en nodo 2)	Compensación distribuida. 3.4 MVAR distribuidos en nodos 3,4 y 5
1 (Vnom = 115 kV)	1	1	1
2 (Vnom=13.8kV)	0.9653	0.9897	0.9899
3(Vnom=480 V)	0.9264	0.9519	0.9749
4(Vnom=13.8kV)	0.9569	0.9815	0.9865
5(Vnom=2.4kV)	0.9384	0.9635	0.9837
Efecto en factor de carga de transformadores			
	Sin compensación	Compensación Centralizada (Banco de capacitores de 3.4 MVAR en nodo 2)	Compensación distribuida. 3.4 MVAR distribuidos en nodos 3,4 y 5
Factor de Carga			
T1(Snom=10MVA)	78.6%	64.1%	63.9%
T2(Snom=1MVA)	94.0%	94.0%	77.0%
T3(Snom=5MVA)	74.2%	74.0%	60.6%

CONCLUSIONES

- La corrección del factor de potencia mejora el desempeño de un sistema eléctrico. Entre los beneficios obtenidos se encuentran los siguientes: eliminación de multa por parte de la compañía suministradora, recuperación de capacidad instalada, reducción de pérdidas y mejora en regulación de voltaje.
- En caso de llevar a cabo la compensación de manera distribuida con filtros de armónicas, es posible reducir la distorsión armónica de corriente y voltaje y mejorar el factor de potencia de distorsión
- La compensación distribuida de factor de potencia beneficia en mayor medida al sistema eléctrico que la compensación centralizada. Estos beneficios adicionales permiten justificar la mayor inversión que se requiere para la corrección de factor de potencia de manera distribuida.
- Para la corrección óptima del factor de potencia de manera distribuida, es necesario llevar a cabo mediciones de los perfiles de demanda de los diferentes grupos de cargas. Estas mediciones permitirán determinar la potencia reactiva necesaria que cada uno de los bancos de capacitores o filtros de armónicas deberán suministrar a cada grupo de cargas.

REFERENCIAS

- <http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/sa02607001e.pdf>
- [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/18aa8879b8cc0186c125761f005035b7/\\$file/Vol.8.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/18aa8879b8cc0186c125761f005035b7/$file/Vol.8.pdf)
- <http://www.powerworld.com>
- <http://www.electrical-installation.org/enw/images/a/a7/L-Power-factor-correction-and-harmonic-filtering.pdf>
- <http://www.iea-4e.org/document/43/power-factor-basics>
- http://www.frako.com/fileadmin/pdf/Downloads/Handbuch/EN/95-00135_11_13_9066_handbuch_blk.pdf
- [https://www3.dps.ny.gov/W/PSCWeb.nsf/96f0fec0b45a3c6485257688006a701a/e962078346938e8985257696006d4a84/\\$FILE/Transmission_Losses_and_Power_Factor-2.pdf](https://www3.dps.ny.gov/W/PSCWeb.nsf/96f0fec0b45a3c6485257688006a701a/e962078346938e8985257696006d4a84/$FILE/Transmission_Losses_and_Power_Factor-2.pdf)
- <https://cpower.com/PDF/InfoSheets/13.pdf>
- <http://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2016/A495781/power-factor-correction-introduction-eng-332405.pdf>
- <http://www.csee.wvu.edu/~kanchanv/power%20factor%20correction.pdf>
- <https://www.progress-energy.com/assets/www/docs/business/power-factor-how-effects-bill.pdf>
- https://www.youtube.com/watch?v=_m6cCpyts-Y&t=417s
- <https://www.youtube.com/watch?v=RU6jtai4wys&t=3s>
- <https://www.youtube.com/watch?v=DoHTzrk8suE>
- <https://www.youtube.com/watch?v=iDYWfBGwT1w>
- <https://www.youtube.com/watch?v=WfzPvVdmUho>
- <https://www.youtube.com/watch?v=flyZs60VO-A>

¡Gracias por su atención!