



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

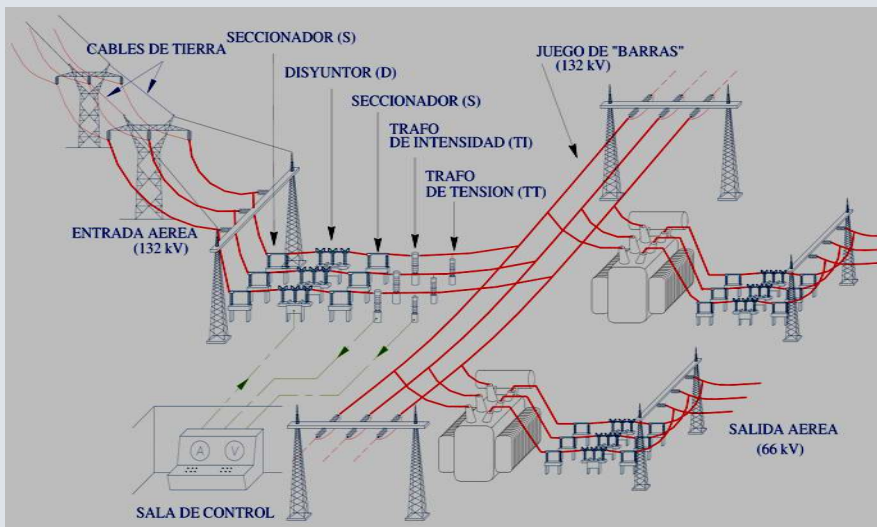
Por: César Chilet

19/03/2013

1. Conceptos de sistemas de potencia

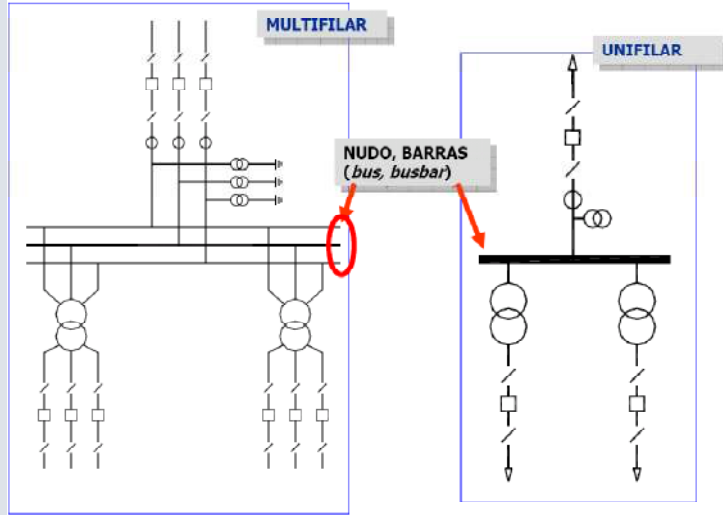


1.1 INTRODUCCIÓN



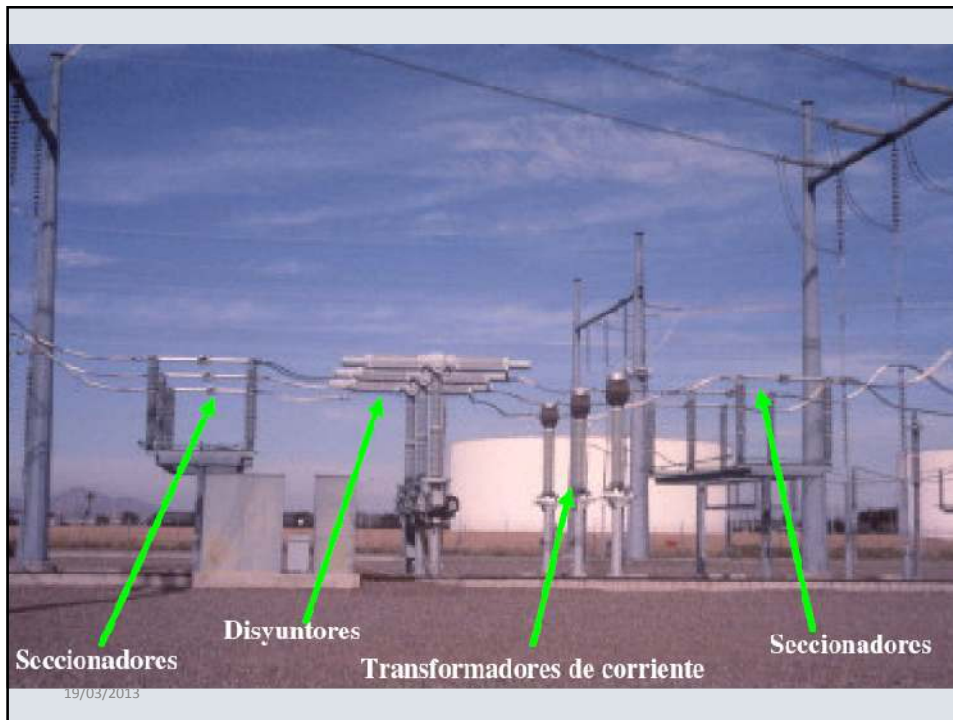
19/03/2013

Esquema de unidas basica SE



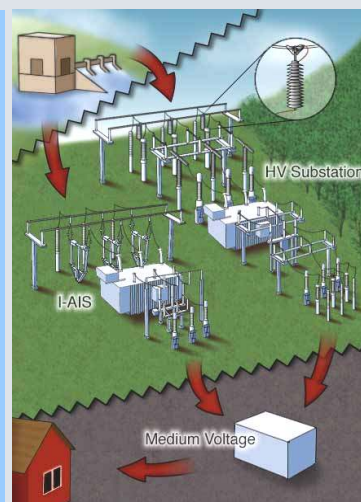
19/03/2013





Sistema de potencia

- Es un conjunto de centrales eléctricas, transformadores, dispositivos de maniobra y otros componentes que están interconectados por líneas aéreas y cables de energía para proveer de electricidad a los consumidores

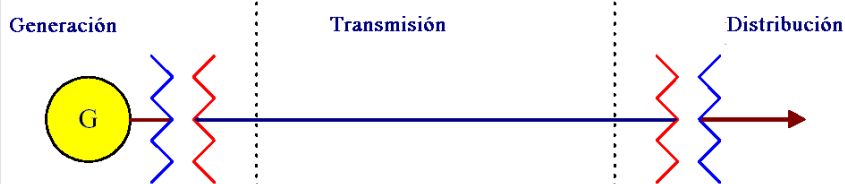


19/03/2013

Partes del sistema de potencia

Puede ser dividido en tres subsistemas:

- Generación: *fuentes de energía eléctrica.*
- Transmisión: *Transporta la energía eléctrica desde las fuentes a los centros de carga en altas tensiones (115 kV y superior).*
- Distribución: *Distribuye la energía eléctrica desde subestaciones (22,9kV-10 kV) al usuarios final.*



19/03/2013

Objetivo de un SEP

- **Generar la energía suficiente, en los lugares apropiados, y transmitirla a los centros de consumo. En estos centros, la energía debe ser distribuida a los consumidores en forma individual, de forma y calidad apropiadas, con los menores costos económico y ecológico con la mayor seguridad posible.**

19/03/2013

Estructura SEP

La estructura de un sistema de potencia es grande y compleja. Sin embargo, ella puede ser dividida en los siguientes componentes principales:

- Fuente de energía.
- Convertidor de energía.
- Sistema de transmisión.
- Sistema de distribución.
- Carga.

19/03/2013

Requisitos

- Durante las etapas de planeamiento y operación de los sistemas eléctricos se debe de observar algunos requisitos:
 - Las demandas de potencia activa y reactiva deben ser integralmente satisfechas.
 - La calidad del servicio, la cual implica en:
 - Pequeñas variaciones de las magnitudes de tensión ($\pm 5\%$ en torno al valor nominal) y de frecuencia ($\pm 0,05$ Hz en torno al valor nominal de 60 Hz).
 - Alta confiabilidad (continuidad del suministro).

19/03/2013

Producción energía eléctrica

Eólica



Combustibles
fósiles

Nuclear

Hidráulica

19/03/2013

Rol de los transformadores

- Gran ventaja de la energía eléctrica es que se puede generar en BT en un generador AC y ser elevado a una tensión más alta para ser transmitida a una distancia mucho mayor.



19/03/2013

Rol de los transformadores

- Esto significa que cada parte del sistema de potencia puede funcionar a una tensión óptima:

- Generadores (11-22 kV)
- Las cargas (10kV, 4.16 kV, 440V, 220V, etc.)
- Transmisión (110 kV, 220 kV, 500 kV, o superior).

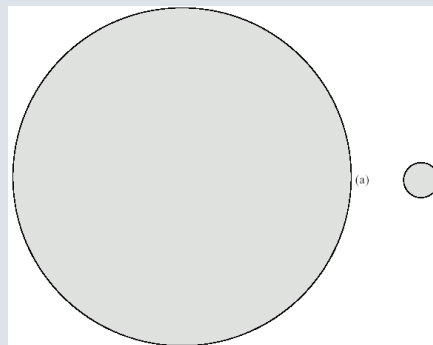


19/03/2013

Rol de los transformadores

- Las altas Tensiones son esenciales para elevar la eficiencia de la transmisión de la energía eléctrica:

- la tensión se eleva en el transformador en un número de veces, la corriente es reducida en la misma proporción.



19/03/2013

Ejemplo

- ¿Cómo transmitir la potencia de 50 MW con factor de potencia de 0,85, por medio de una línea de transmisión trifásica con conductores de aluminio, desde una central hidroeléctrica, cuya tensión nominal del generador es de 13,8 kV, hasta el centro de consumo situado a 100 km?, admitiéndose una pérdida óhmica (I^2R) de 2,5 % en la línea, determine el diámetro del cable para una transmisión en: a) 13,8 kV, y en b) 138 kV.

19/03/2013

Considerando a transmissão em 13,8 kV:

A corrente de linha é calculada pela fórmula $I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos\varphi}$.

Substituindo os valores de P, V e $\cos\varphi$ resulta uma corrente de 2.461,0 A.

A perda de 2,5% significa uma potência dissipada de 1.250 kW. Tendo-se a corrente e a potência dissipada podemos determinar a resistência do condutor pela fórmula $R = \frac{P_d}{3I^2}$, obtendo-se o valor de 0,2064 Ω .

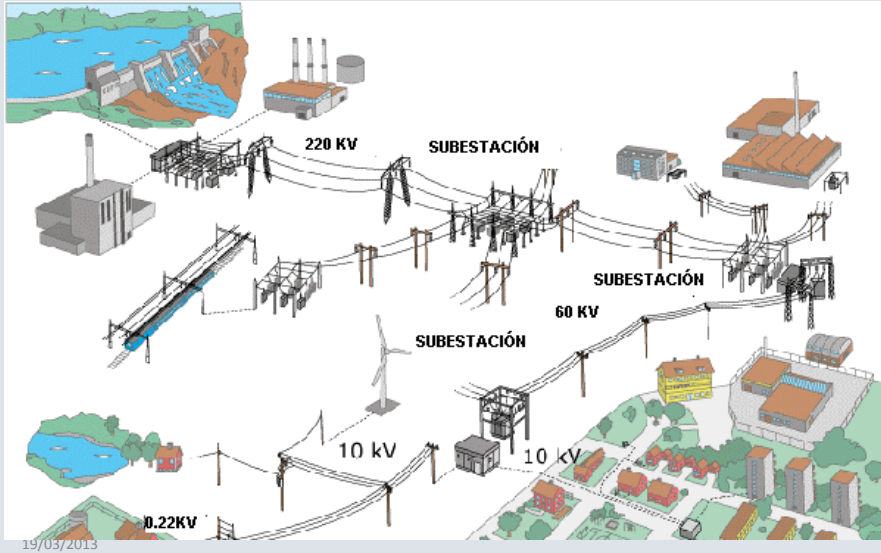
Tendo-se a resistência, a resistividade do alumínio ($0,02688 \Omega \frac{mm^2}{m}$) e o comprimento, podemos determinar a seção reta do condutor pela fórmula $S = \rho \frac{l}{R}$, obtendo-se 39.069,8 mm^2 . Esta seção corresponde a um cabo cujo diâmetro é de **223,0 mm**.

Considerando a transmissão em 138 kV:

Seguindo-se os mesmos passos obtém-se um cabo com diâmetro de **22,3 mm**.

19/03/2013

Sistemas de entrega de la energía eléctrica



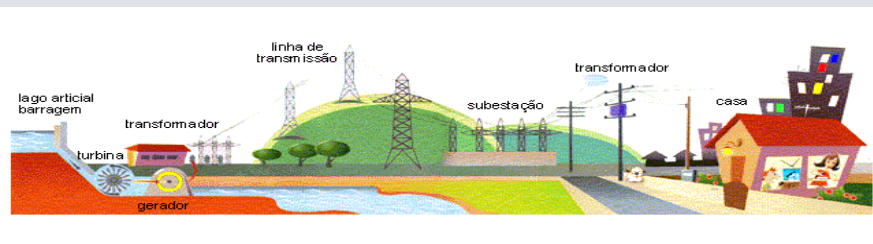
Sistemas de entrega de la energía eléctrica

Este sistema de la entrega de energía se refiere al sistema de transmisión y distribución (T&D)

- Miles de km de L.T. y distribución.
- Cientos de SE, transformadores y otros equipos.
- Gran área geográfica.
- Interconectados.
- Operando adecuadamente.
- Satisfaciendo necesidades del cliente.

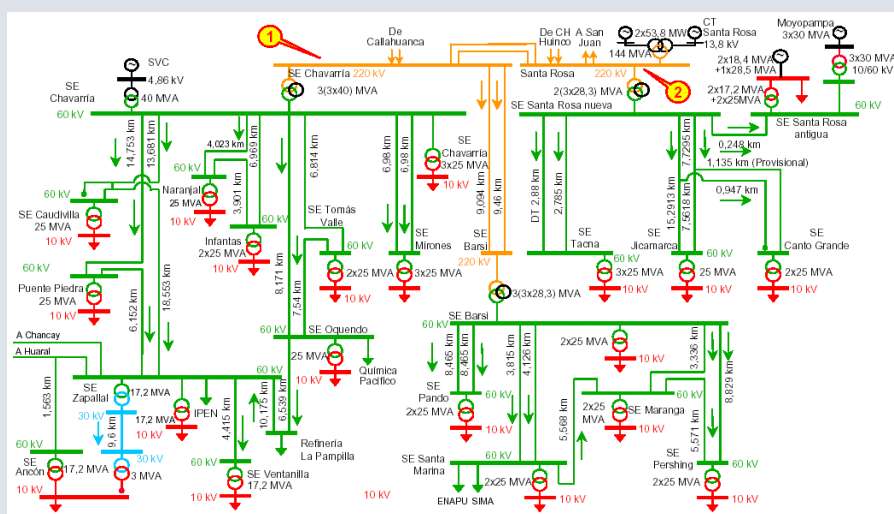
Función de T&D

- Entregar energía eléctrica confiable a los consumidores de electricidad en el lugar de consumo y lista para ser usado.



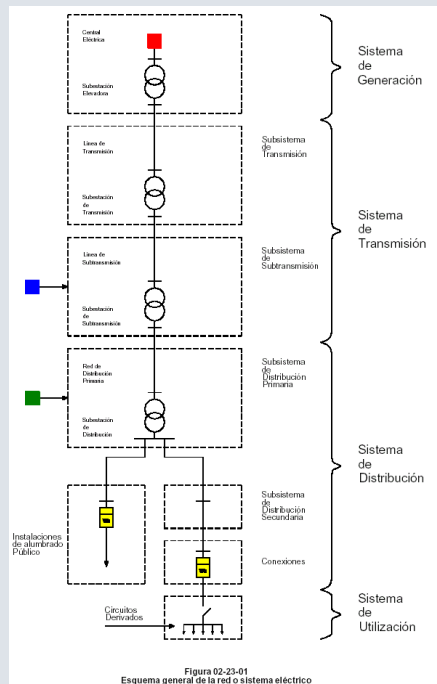
19/03/2013

Transporte de energía eléctrica



19/03/2013

Esquema general del sistema eléctrico



19/03/2013

Niveles de tensión

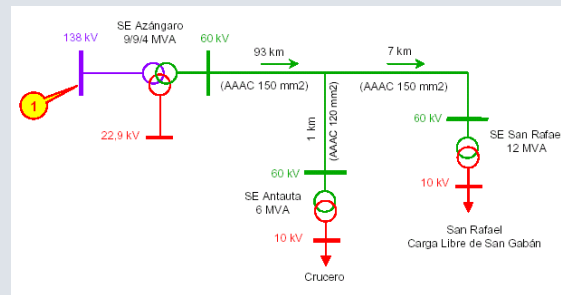
Los valores normalizados en muchos países son:

- a) Transmisión: 750; 500; 220; 138; 69 kV.
- b) Subtransmisión: 138; 110; 60; 34,5 kV.
- c) Distribución Primaria: 34,5; 22,9; 10 kV.
- d) Distribución Secundaria: 380/220V, 220V.

19/03/2013

Según la topología

- Radial .
- En anillo (mallado).



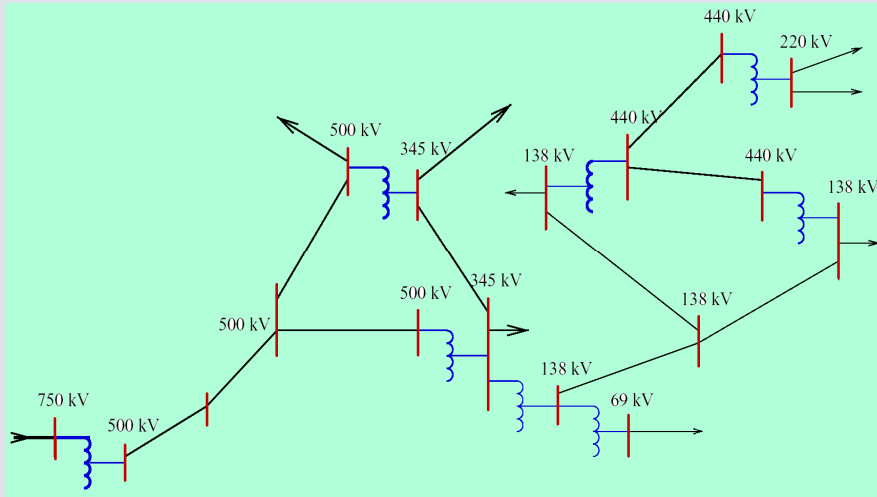
19/03/2013

Interconexión

- **Ventajas.**
 - Economía;
 - Confiabilidad;
 - Mejor utilización de los recursos
- **Problemática:**
 - Incremento del nivel de corriente de falla.
 - Propagación de los disturbios a otros sistemas.
 - Mayor dificultad en satisfacer el requisito en cuanto a la frecuencia de operación.

19/03/2013

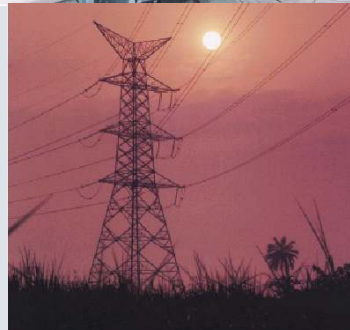
Interconexión



19/03/2013

Sistema de transmisión

- Se extiende desde la fuente de generación.
- Consiste de cables subterráneos y conductores aéreos de conductores separados.



19/03/2013

Subestaciones de distribución



- Sirve a su propia área de carga.
- Reduce la tensión de subtransmisión.
- Consiste de uno o más bancos de transformadores de potencia con el equipo de regulación de tensión necesaria, barras y equipos de protección, control y maniobra

19/03/2013

Transformadores de distribución



- Reduce la tensión de distribución de MT al nivel de utilización de BT.

19/03/2013

Distribución en BT

- Funciona desde la barra de baja tensión a los centros de carga donde se ramifica los alimentadores trifásicos y laterales monofásicos

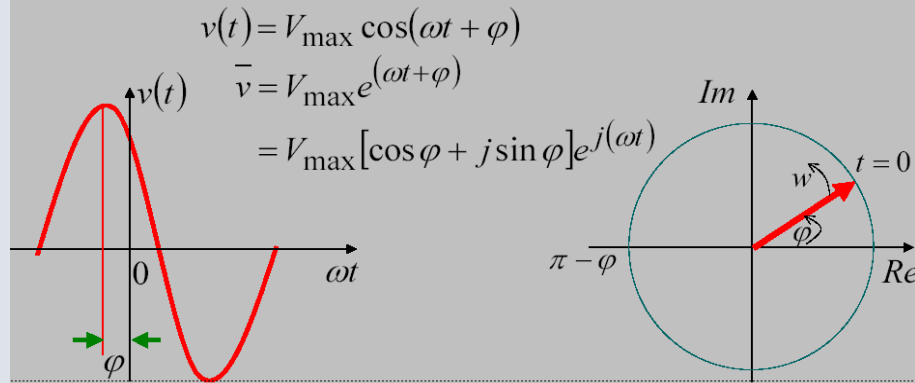


19/03/2013

1.2 CONCEPTOS DE POTENCIA

Introducción

Representación sinusoidal y fasorial de corrientes y voltajes



ω = velocidad angular , ϕ = ángulo de fase, V_{\max} = amplitud

19/03/2013

33

Valor eficaz

Concepto de Valor Efectivo o RMS

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

Representación fasorial a través de Valor Efectivo

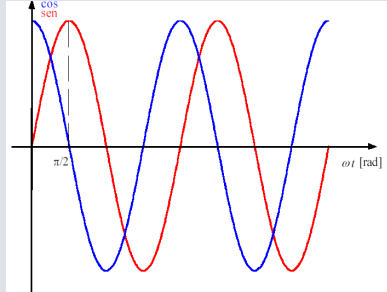
$$\bar{V} = V e^{j\varphi} = V [\cos \varphi + j \sin \varphi]$$

- La suma de dos funciones sinusoidales en el tiempo corresponde con la suma de vectores en el plano complejo
- Derivadas y/o integrales de funciones del tiempo (capacidades, inductancias) se traducen en el plano complejo en giros de fasores. Ecuaciones diferenciales comunes se transforman en ecuaciones algebraicas.

19/03/2013

34

Seno y Coseno



- Un ángulo de fase $\phi = -\pi/2$, transforma la función coseno en seno.

$$\text{Sen } \omega t = \text{Cos} \left[\omega t - \frac{\pi}{2} \right]$$

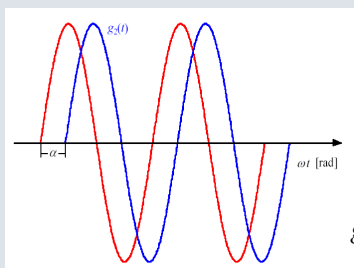
$$\text{Cos } \omega t = \text{Sen} \left[\omega t + \frac{\pi}{2} \right]$$

19/03/2013

35

Desfasaje

Desfasaje es la diferencia entre los ángulos de fase de las funciones de tipo senoidal de la misma frecuencia angular ω .



$$\text{Siendo } g_1(t) = G_1 \cdot \text{Cos}(\omega t + \phi_1)$$

$$g_2(t) = G_2 \cdot \text{Cos}(\omega t + \phi_1 - \alpha)$$

$$\phi_2 = \phi_1 - \alpha$$

El desfasaje entre $g_1(t)$ y $g_2(t)$ es

$$\phi_1 - \phi_2 = \phi_1 - (\phi_1 - \alpha) = \alpha$$

$g_1(t)$ está adelantada respecto a $g_2(t)$ un ángulo α .

$g_2(t)$ está atrasada respecto a $g_1(t)$ un ángulo α .

19/03/2013

36

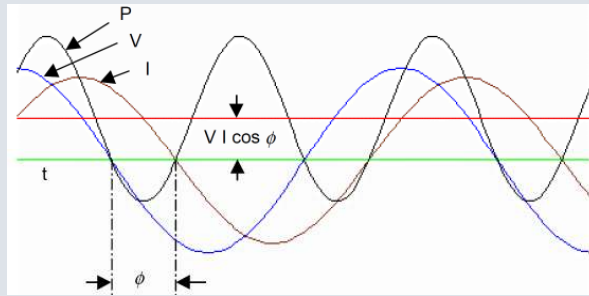
1.2.1 Sistemas monofásicos

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

$$i(t) = I_m \cos(\omega t - \phi)$$

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

$$p(t) = V_m \cos(\omega t) \cdot I_m \cos(\omega t - \phi)$$



Potencia Instantánea

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} [\cos \phi + \cos(2\omega t - \phi)]$$

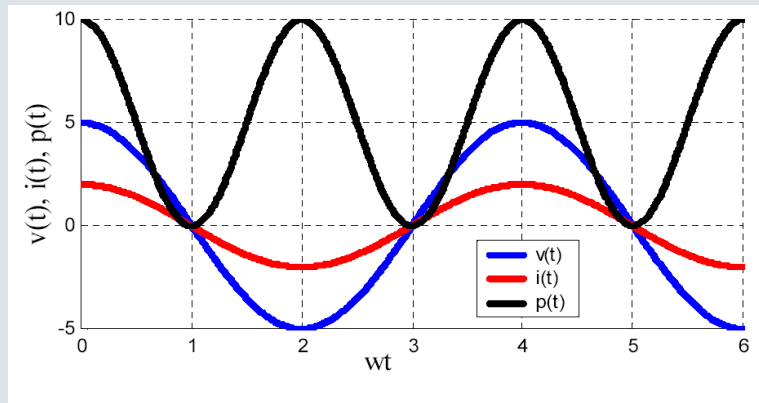
Potencia promedio

- Dado que el promedio de $\cos(2\omega t - \phi) = 0$.
- Entonces:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi$$

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi$$

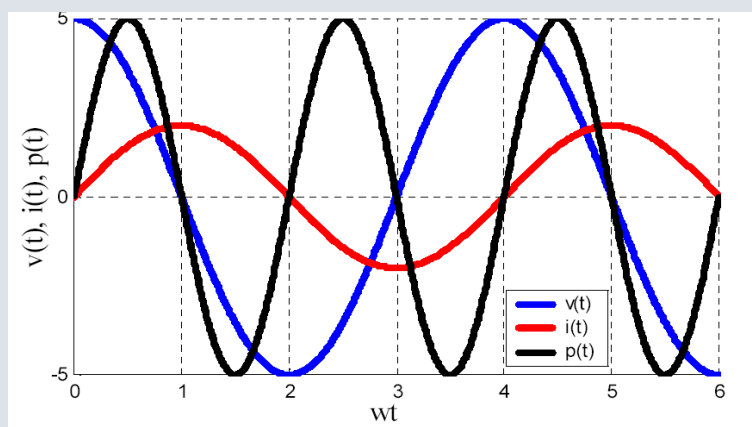
Corriente en fase con la tensión



19/03/2013

39

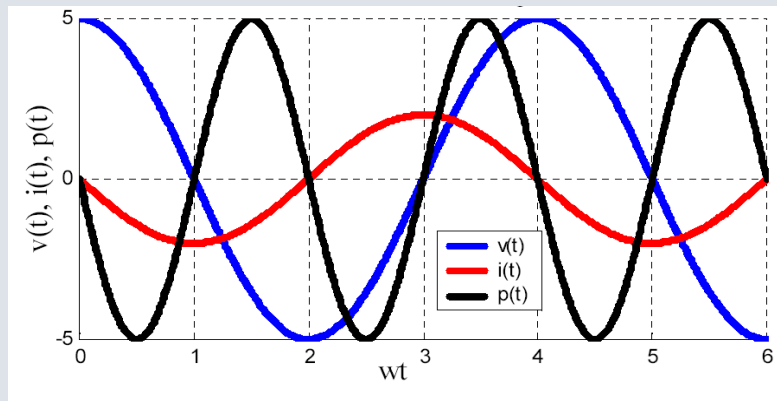
Corriente atrasada en 90°



19/03/2013

40

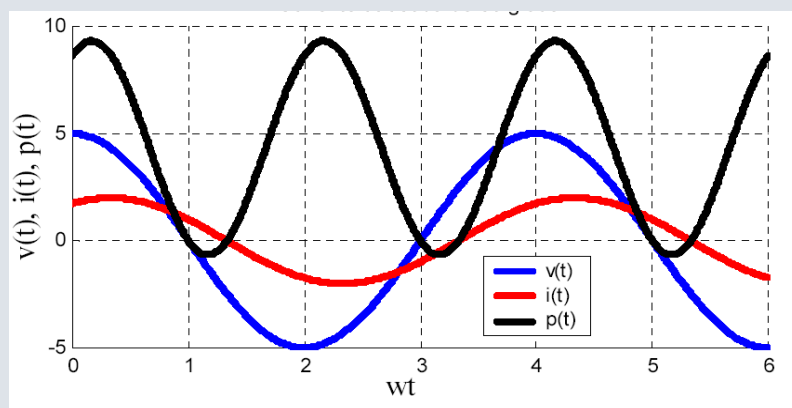
Corriente adelantada 90°



19/03/2013

41

Corriente atrasada 30°



19/03/2013

42

Potencia compleja

Magnitudes fasoriales de Tensión y corriente conocidas

$$V = |V| \angle 0^\circ \quad \text{and} \quad I = |I| \angle -\phi$$

La potencia compleja o la potencia aparente S es definida como el producto de la tensión por la conjugada de la corriente:

$$S = V \cdot I^* = |V| \cdot |I| \angle \phi$$

$$S = |V| \cdot |I| \cos \phi + j |V| \cdot |I| \sin \phi$$

Donde el ángulo ϕ es el ángulo entre la tensión y la corriente. La ecuación anterior puede ser

escrita como: $S = P + jQ \quad (VA)$

Potencia activa y reactiva

- **Potencia activa** (eficaz, útil, que produce trabajo): valor medio de la potencia instantánea.

$$P \triangleq \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [VI \cos \theta [1 + \cos(2\omega t + 2\phi)] + VI \sin \theta \sin(2\omega t + 2\phi)] dt$$

$$P = VI \cos \theta \quad [W]$$

- **Potencia reactiva** corresponde al valor máximo de la parte en $\text{Sen}(2\omega t + 2\phi)$ de la potencia instantánea.

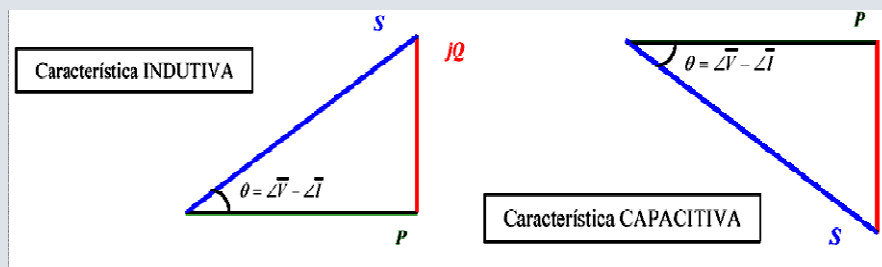
Convención: INDUCTOR: "consume" potencia reactiva.

CAPACITOR: "genera" potencia reactiva.

Triángulo de potencias

- Los signos de P y Q son importantes en el conocimiento de la dirección del flujo de potencia

$$S = V \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{VA}]$$



19/03/2013

45

Factor de potencia

- Es obtenido por la relación entre las potencias activa y aparente

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{VI} = \cos \theta$$

19/03/2013

46

Potencia compleja

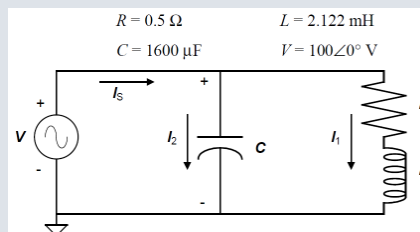
$$P = |V| \cdot |I| \cos(\phi) \quad (W)$$

$$Q = |V| \cdot |I| \sin(\phi) \quad (VAr)$$

$$\cos \phi = \cos \left[\arctan \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{|S|}$$

Ejemplo 1

- En el circuito mostrado hallar:
 - a. La corriente de entrada (I_s)
 - b. Las potencias suministrada por la fuente: P , Q y S .
 - c. El factor de potencia del circuito.



Ejemplo 1

$$I_1 = \frac{V}{R + j\omega L} = \frac{100\angle 0^\circ \text{ V}}{0.5 \Omega + j(377 \text{ r/s})(2.122 \times 10^{-3} \text{ H})} = 106.0\angle -58.0^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = V \cdot (j\omega C) = j(100 \text{ V})(377 \text{ r/s})(1.6 \times 10^{-3} \text{ F}) = 60.3\angle 90^\circ \text{ A}$$

$$I_S = I_1 + I_2 = 106.0\angle -58.0^\circ \text{ A} + 60.3\angle 90^\circ \text{ A} = 63.5\angle -27.8^\circ \text{ A}$$

$$S = V \cdot I^* = (100\angle 0^\circ \text{ V})(63.5\angle 27.8^\circ \text{ A}) = 6350\angle 27.8^\circ \text{ VA}$$

$$S = 5617 + j 2962 \text{ VA}$$

$$P = 5617 \text{ W}$$

$$Q = 2962 \text{ Var}$$

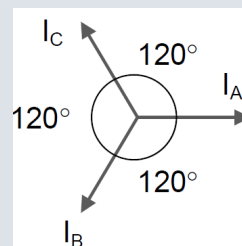
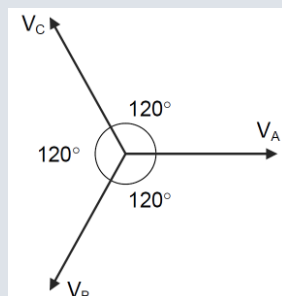
$$\phi = 27.8^\circ$$

$$PF = \cos(\phi) = \cos(27.8^\circ) = 0.88 \text{ lagging}$$

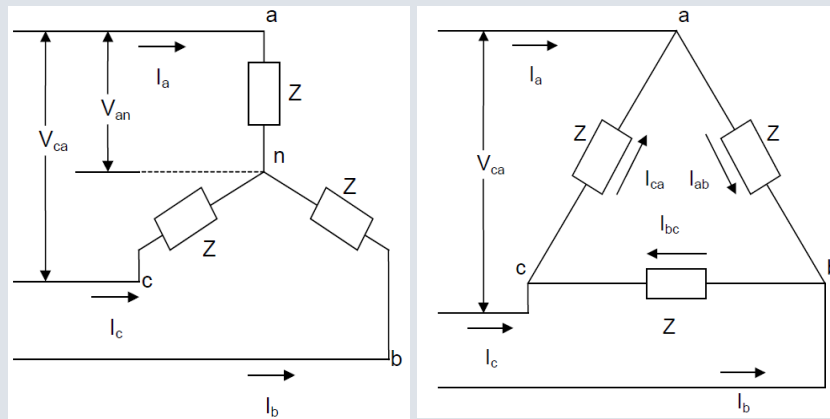
1.2.2 Sistemas trifásicos

Se asume: potencia eléctrica generada, transmitida, y distribuida usando un sistema trifásico balanceado.

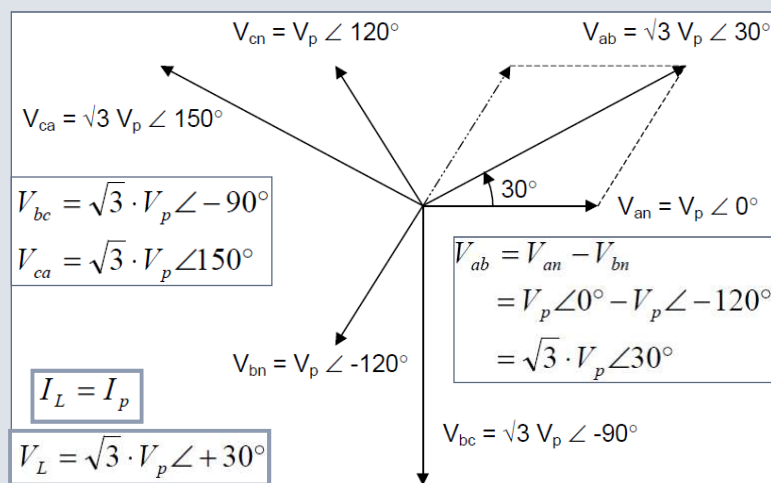
Sistema trifásico balanceado: constituido de tres fuentes monofásicas de la misma magnitud y frecuencia, pero desfasadas 120° entre si.



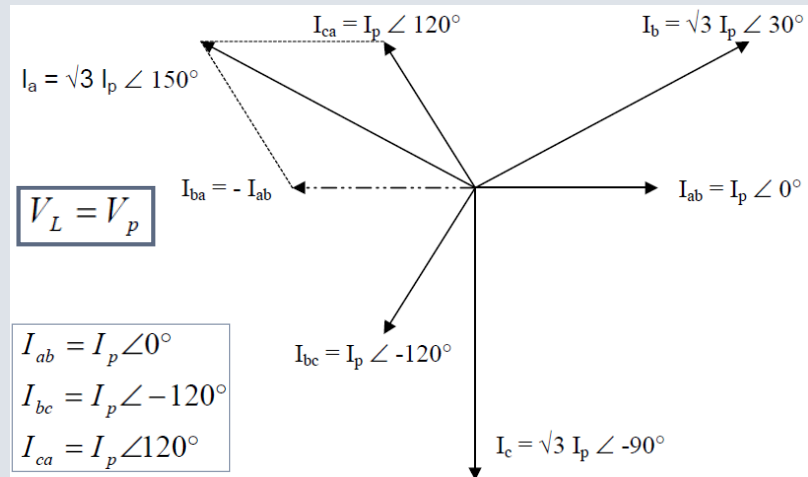
Conexión Y o Δ



Relación entre Tensiones y corrientes Conexión Y



Relación entre Tensiones y corrientes Conexión Δ



Relación entre Tensiones y corrientes Conexión Δ

$$I_a = I_{ca} - I_{ab} = I_p \angle 120^\circ - I_p \angle 0^\circ$$

$$= \sqrt{3} \cdot I_p \angle 150^\circ$$

$$I_b = \sqrt{3} \cdot I_p \angle 30^\circ$$

$$I_c = \sqrt{3} \cdot I_p \angle -90^\circ$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_p \angle +30^\circ$$

Relación entre potencias

Asumiendo que la fuente trifásica balanceada suministra energía a una carga trifásica balanceada.

$$V_a(t) = \sqrt{2} \cdot V_p \sin(\omega t)$$

$$V_b(t) = \sqrt{2} \cdot V_p \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_c(t) = \sqrt{2} \cdot V_p \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$I_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \sin(\omega t - \phi)$$

$$I_b(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \sin(\omega t - 120^\circ - \phi)$$

$$I_c(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \sin(\omega t + 120^\circ - \phi)$$

Potencia activa trifásica

$$P_{3\phi} = V_a \cdot I_a \cdot \cos \phi + V_b \cdot I_b \cdot \cos \phi + V_c \cdot I_c \cdot \cos \phi$$

$$P_{3\phi} = V_p I_p \{3 \cos \phi - [\cos(2\omega t - \phi) + \cos(2\omega t - 240 - \phi) + \cos(2\omega t + 240 - \phi)]\}$$

$$P_{3\phi} = 3 \cdot V_p I_p \cos(\phi)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L I_L \cos(\phi)$$

Potencia compleja

$$S_{3\phi} = 3 \cdot V_p \cdot I_p^*$$

$$= \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L^*$$

If $V_p = |V_p| \angle 0^\circ$ and $I_p = |I_p| \angle -\phi$

$$S_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \angle \phi$$

$$S_{3\phi} = 3|V_p||I_p|(\cos \phi + j \sin \phi)$$

$$= P_{3\phi} + jQ_{3\phi}$$

$$P_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \cos \phi = \sqrt{3}|V_L||I_L| \cos \phi$$

$$Q_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \sin \phi = \sqrt{3}|V_L||I_L| \sin \phi$$