



**“EXPLICACIÓN BÁSICA DE PRINCIPIOS DE
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA
ELECTROFLOW“**



Enero de 2006

Antecedentes:

Debido a la explicación en la vista anterior, se pretenderá reproducir lo allí expuesto, en lo posible con esquemas y ecuaciones básicas que conjuntamente con las nociones generales ayuden a interpretar el principio de operación del sistema **ELECTROFLOW**.

Objetivo:

Procurar explicar en términos generales los principios de operación del sistema **ELECTROFLOW**, específicamente lo relacionado con su función de regulación de Voltaje.

Anexo N° 1

”Marco Teórico”

Explicación teórica

Explicación descriptiva

Explicación teórica:

Regulación de Voltaje:

Determinaremos el comportamiento del Voltaje sin compensación, donde identificaremos los más importantes parámetros de la carga y del sistema de suministro. Introduciremos el concepto de compensador ideal que mantiene constante el Voltaje en el punto de suministro al mantener la potencia reactiva aproximadamente constante. Las características del compensador serán desarrolladas gráfica y matemáticamente.

La regulación de Voltaje se puede definir como el cambio proporcional (o por unidad) en la magnitud del Voltaje de suministro asociado con un definido cambio en la corriente de carga (ej; de sin carga a plena carga). Esto es causado por la caída de Voltaje en la impedancia de la fuente que lleva la corriente de carga. Si el sistema de suministro es representado por una fase. El circuito equivalente se muestra en la figura 2(a), Entonces la regulación de Voltaje es dado por:

$$\frac{(\Delta V / V)}{(I_l / I_l)} = \frac{(\Delta V / V)}{I_l}$$

En ausencia de un compensador, el cambio al Voltaje de suministro causado por la corriente de carga I_l es mostrado en la figura 2 (b), y:

$$\Delta V = E - V = Z_S I_l \quad (10)$$

Ahora $Z_S = R_S + jX_S$, mientras de la ecuación 2,

$$S_l = VI_l$$

$$S_l = V^2 G_l - jV^2 B_l$$

$$S_l = P_l + jQ_l$$

$$I_l = \frac{P_l - jQ_l}{V}, \quad (11)$$

$$\Delta V = (R_S P_l + X_S Q_l) \frac{(P_l - jQ_l)}{V} = \frac{(R_S P_l + X_S Q_l)}{V} + \frac{j(X_S P_l - R_S Q_l)}{V}$$

$$\Delta V = \Delta V_R + j\Delta V_X \quad (12)$$

El cambio de Voltaje tiene una componente ΔV_R en fase con V y una componente ΔV_X en cuadratura con V ; como se ilustra en la figura 2(b)

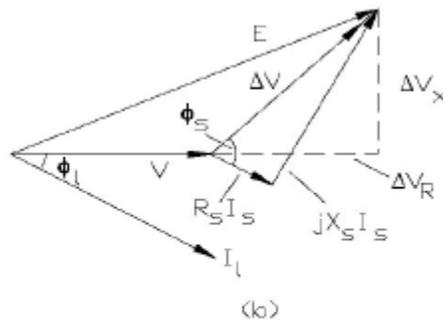
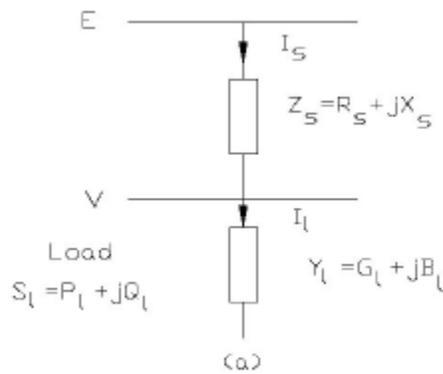


Figure 2. (a) Equivalent circuit of load and supply system.
(b) Phasor diagram for Figure 2a (uncompensated).

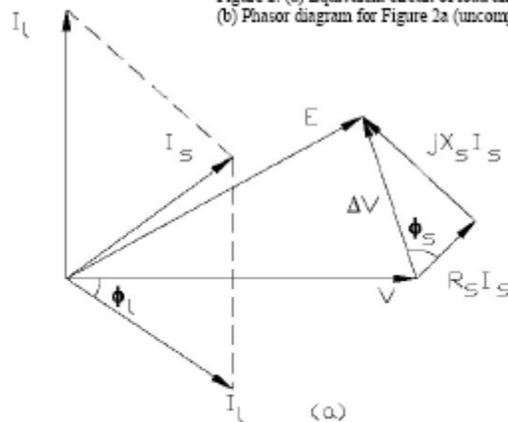


Figure 3.(a) Phasor diagram for Figure 2a (compensated for constant voltage).

Es claro que la magnitud y

la fase de V , relativa al Voltaje de suministro E , son funciones de la magnitud y fase de la corriente de carga; o, en otras palabras, el cambio de voltaje depende las potencias real y reactiva de la carga.

Agregando un compensador con la carga, es posible hacer $|E| = |V|$; que es hacer el Voltaje de regulación cero, o mantener la magnitud del Voltaje de suministro constante al valor E en presencia de la carga. Esto se muestra en la figura 3 (a) para un compensador puramente reactivo. La potencia reactiva Q_l en la ecuación (12) es remplazada por la suma $Q_s = Q_y + Q_l$, y Q_y es ajustada de tal forma como rota el fasor ΔV hasta $|E| = |V|$. de las ecuaciones 10 y 12, tenemos;

$$|E|^2 = \frac{[V + (R_s P_l + X_s Q_s)]^2}{[V]} + \frac{[X_s P_l - R_s Q_s]^2}{[V]} \quad (13)$$

El valor requerido de Q_y se encuentra solucionando la ecuación para Q_s con $|E| = V$ entonces $Q_y = Q_s - Q_l$. En compensador real el valor sería determinado automáticamente por el lazo de control. Lo que es importante aquí es que siempre hay una solución para Q_s lo el valor de P_l . Lo que lleva a la importante siguiente conclusión:

Un compensador puramente reactivo puede eliminar variaciones en el Voltaje de suministro causadas por cambios en la potencia real y reactiva de la carga.

Suponiendo que el compensador de potencia reactiva pueda ser controlado fácilmente, sobre un suficiente rango (en adelanto y en atraso, en general) y para un adecuado rango, el compensador puede funcionar como un regulador ideal de Voltaje. Debe comprenderse que solamente la **magnitud** del Voltaje esta siendo controlada y la **fase** varía constantemente con la corriente de carga.

Nosotros ya hemos repasado cómo el compensador puede reducir a cero la potencia reactiva suministrada por el sistema. Es decir, en lugar de actuar como un regulador de voltaje, el compensador actúa como corrector de factor de potencia. Si el compensador se diseña para hacer esto, podemos remplazar Q_l en la ecuación (12) por $Q_s = Q_l + Q_y$, que es cero. El fasor de cambio de voltaje es entonces:

$$\Delta V = \frac{R_s P_\ell + jX_s P_\ell}{V} = (R_s + jX_s) \frac{P_\ell}{V}$$

El cual es independiente de Q_ℓ y no esta bajo el control del compensador.

Por lo tanto;

El compensador puramente reactivo no puede mantener constante ambas variables en forma constante el Voltaje y el Factor de Potencia al mismo tiempo.

La única excepción a esta regla es cuando $P_\ell = 0$, pero esto no resulta ni práctico ni interesante. Es importante hacer notar que el principio se refiere al Factor de Potencia instantáneo: Es realmente posible para un compensador completamente reactivo mantener voltaje constante y un **promedio** del Factor de Potencia.

Fórmula aproximada para la regulación de Voltaje:

La expresión para ΔVR y ΔVX en la ecuación (12) algunas veces se da en una forma alternativa útil, como sigue. Si el sistema es corot circuitazo en la barra de carga, “**La potencia aparente de corto circuito**” será:

$$S_{SC} = P_{SC} + jQ_{SC} = EI_{SC}^* = \frac{E^2}{Z_{SC}} \quad \text{Donde } Z_{SC} = R_s + jX_s \text{ y } I_{SC} \text{ es la corriente de corto circuito.}$$

$$R_s = |Z_{SC}| \cos \phi_{SC} = \frac{E^2}{S_{SC}} \cos \phi_{SC}$$

Subsecuentemente $|Z_{SC}| = |Z_{sc}|$, tenemos que:

$$X_s = |Z_{SC}| \sin \phi_{SC} = \frac{E^2}{S_{SC}} \sin \phi_{SC}, \quad \tan \phi_{SC} = \frac{X_s}{R_s}$$

Que es, la razón $\mathbf{X} : \mathbf{R}$ del sistema de suministro. Sustituyendo en la ecuación (12) para \mathbf{R}_s y \mathbf{X}_s normalizando $\Delta \mathbf{V}_R$ y $\Delta \mathbf{V}_X$ a \mathbf{V} , y asumiendo que $\mathbf{E}/\mathbf{V} \approx 1$, tenemos:

$$\frac{\Delta V_R}{V} \cong \frac{1}{S_{SC}} [P_\ell \cos \phi_{SC} + Q_\ell \text{sen} \phi_{SC}] \quad (19)$$

y

$$\frac{\Delta V_X}{V} \cong \frac{1}{S_{SC}} [P_\ell \text{sen} \phi_{SC} - Q_\ell \cos \phi_{SC}] \quad (20)$$

Muy a menudo $\Delta \mathbf{V}_X$ es ignorado en el entendido que este tiende solamente a producir cambio de la fase en el Voltaje en el punto de suministro (relativo a E), La dimensión del cambio en amplitud se representa por $\Delta \mathbf{V}_R$. La ecuación (19) es comúnmente citada en la literatura. Aunque aproximadamente, las fórmulas son muy usadas en expresar en términos de cantidades que son en lenguaje común: nivel de falla o nivel de corto circuito \mathbf{S}_{SC} , la razón $\mathbf{X}:\mathbf{R}$ (ej. $\tan \theta_{SC}$), y la potencia y potencia reactiva de la carga, \mathbf{P}_ℓ y \mathbf{Q}_ℓ . Para exactitud en los resultados, la expresión en la ecuación (19) y (20) deben ser multiplicadas por $\mathbf{E}^2 / \mathbf{V}^2$.

Hasta ahora las ecuaciones se han escrito como si $\Delta \mathbf{V}$ fuese asociado con escala total de $\mathbf{0}$ hasta \mathbf{P}_ℓ o de $\mathbf{0}$ hasta \mathbf{Q}_ℓ en la carga. Las ecuaciones (12), (19) y (20) son también validas para pequeños cambios de \mathbf{P}_ℓ y \mathbf{Q}_ℓ ; así por ejemplo;

$$\frac{\Delta V_R}{V} \cong \frac{1}{S_{SC}} [\Delta P_\ell \cos \phi_{SC} - \Delta Q_\ell \text{sen} \phi_{SC}]$$

Para

pequeños cambios.

Si la resistencia de de la fuente \mathbf{R}_s es mucho menor que la reactancia \mathbf{X}_s , se puede ser omitir los cambios de Voltaje causados por oscilaciones en la potencia real $\Delta \mathbf{P}_\ell$, así que la regulación de Voltaje es gobernada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{\Delta V_R}{V} = \frac{\Delta Q_\ell}{S_{SC}} \text{sen} \phi_{SC} \cong \frac{\Delta Q_\ell}{S_{SC}}$$

Que es, el cambio de Voltaje por unidad u oscilaciones es igual a la razón de la oscilación de potencia reactiva y el nivel de corto circuito del sistema de suministro. Esta relación puede ser representada gráficamente, como en la figura 4, la cual muestra las características de Voltaje del sistema de suministro (o línea de carga del sistema) como aproximación lineal. Una representación alternativa es:

$$V \cong \frac{E}{1 + Q_l / S_{SC}} \cong E \left[1 + \frac{Q_l}{S_{SC}} \right]$$

Sí $Q_l \ll S_{SC}$.

Aunque las características son solo una aproximación, es muy usada en la visualización de la acción de la compensación, tal como aparece abajo.

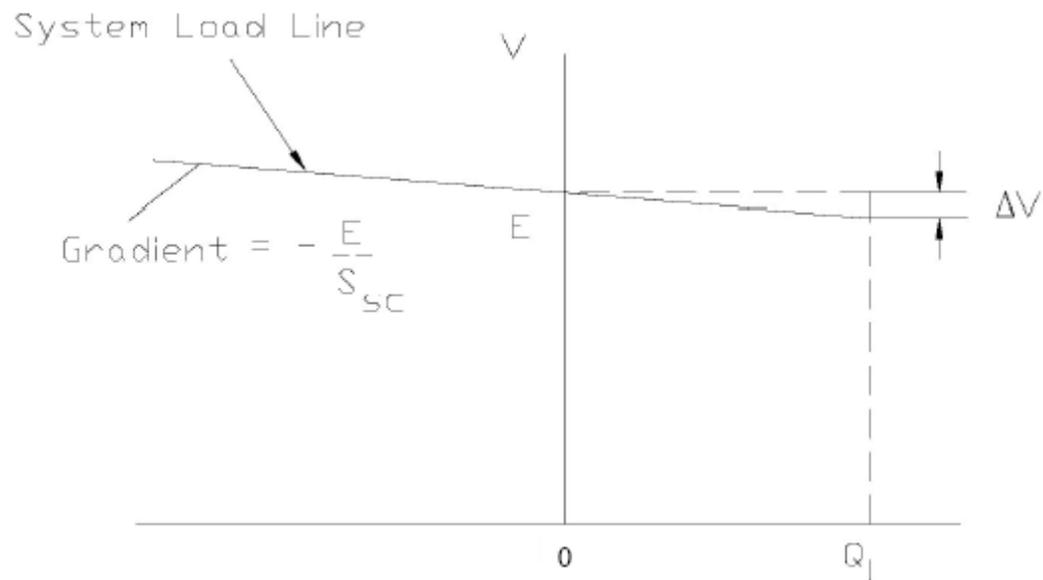


FIGURE 4. Supply system approximate voltage / reactive power characteristic.

Explicación descriptiva:

¿Cómo Funciona el sistema Electroflow?

En un evento si la fuente de Voltaje fluctúa regularmente en indeseables rangos, a saber tanto como +/-20%. **Electroflow™** puede efectivamente remediar tal rango de fluctuaciones de Voltaje, por debajo de esto (Apagón) requiere una protección adicional que es opcional.

El corazón del sistema regulador es el transformador de Voltaje constante, el cual tiene una estructura del núcleo magnético diferente a un transformador convencional. Esta diferencia consiste en una derivación magnética con un entrehierro variable (fijo a 60 Hz) interpuesto entre los bobinados primarios y secundarios. El Voltaje secundario derivado de un circuito fijo **RC**. A la aplicación de un Voltaje primario, el Voltaje secundario incrementa a un punto al cual una porción del núcleo magnético directamente bajo el bobinado secundario se aproxima a la saturación dada la carga capacitiva conectada a través el bobinado secundario.

Como el núcleo se aproxima a la saturación, este no puede acarrear flujo magnético adicional, y el incremento en el Voltaje secundario es menor que cualquier incremento proporcional en el Voltaje primario, sobre el rango del Voltaje primario especificado, el núcleo bajo el bobinado secundario esta magnéticamente saturado, resultando en estabilidad de Voltaje sobre el lado del secundario para el rango del Voltaje primario. Dada la derivación magnética entre los bobinados primario y secundario, parte del núcleo debajo del primario es no saturado.

Para la igualación del pequeño efecto de incremento de Voltaje **primario** ($+\Delta V_p$) sobre el secundario, una bobina de compensación (**s**) es devanada sobre la bobina primaria (**p**) y conectada en serie con el circuito de carga **secundario**, pero desfasado con el secundario. De esta manera cuando el Voltaje primario se incrementa más allá del Voltaje de diseño, el Voltaje en la bobina de compensación también incrementa, pero como está fuera de fase con el Voltaje secundario, este sustrae del Voltaje secundario una cantidad igual al ligero incremento inducido en el bobinado secundario por el incremento del Voltaje primario **(1)**. Del mismo modo, cuando el Voltaje primario sustrae ($-\Delta V_p$) del Voltaje secundario **(2)**. El diseño es tal que el vector suma de la bobina de compensación de Voltaje y el Voltaje secundario es prácticamente constante a través del rango de diseño del Voltaje de entrada.

El núcleo saturado actúa como un sumidero y esencialmente absorbe cualquier ruido y sobretensión que ingrese a la entrada. El ruido y sobretensiones no pueden transferirse a través del núcleo del transformador a la salida.

Una adicional característica es que los embobinados de entrada y la salida (Primario y Secundario) son físicamente separados. Esto resulta en bajo acople entre la entrada y la salida el cual ayuda a la reducción de ruido en modo común y modo normal. Pero lo más importante, esto reduce las armónicas creadas por el equipo protegido obtenidas de regreso a la entrada, y entrando al sistema eléctrico.

Cuando el transformador es sobrecargado en exceso de rango de carga, el Voltaje cae a aproximadamente cero. Dado por la derivación magnética en el transformador, la corriente de salida es limitada. Como resultado de la excesiva corriente de carga, el efecto **RC** se pierde. Esto da como resultado un flujo secundario opuesto al flujo primario para desmagnetizar a la pierna del núcleo secundario, y el Voltaje de salida colapsa; limitando la corriente de corto circuito a aproximadamente 150% de plena carga.

¿Porqué bajar el Voltaje en el transformador alimentador?

Una explicación funcional es que debido a la característica intrínseca del capacitor (condensador) este se carga a un Voltaje por arriba de su voltaje nominal y se descarga por debajo de su voltaje nominal, de igual forma el nivel de Voltaje de saturación requerido por el núcleo magnético del reactor en su lado secundario, nos obliga a mantener el Voltaje dentro de su rango nominal, siendo estos componentes pasivos del parte del sistema **RLC** y esenciales en la característica de estabilización de Voltaje.

Gracias al acatamiento de mantener el Voltaje dentro de sus valores nominales el sistema **Electroflow** logra un desempeño eficiente de sus funciones de:

1. Mejorar la estabilidad del Voltaje
2. Balanceo trifásico
3. Filtrado de sobrevoltajes y transitorios
4. Mitigación de armónicas
5. Mejoramiento del factor de potencia

Explicación teórico descriptiva:

Fundamentos:

Los problemas de calidad de la energía tienen su origen en la interacción de la carga y la fuente, más exactamente entre el origen que causa la distorsión y las impedancias de la misma fuente y la de la carga, por lo que podemos afirmar que las impedancias en el sistema regulan tanto el flujo de las distorsiones como la amplitud y duración de las distorsiones que se presenten.

La causa de que un sistema sea susceptible es la disposición de reactivo, que es capaz de controlar los fenómenos electromagnéticos que se presenten, o sea lo robusto del sistema.

Visto en otra forma es la relación de corto circuito del sistema I_{SCR} que se desprende de la relación X/R.

Nota: Para mayor detalle teórico ver **anexo N° 1 "Marco teórico"**

El reactivo presente en un sistema se puede describir con la siguiente ecuación.

$$k \text{ VAr} = 2\pi f C \times k \text{ V}^2 \times 10^3$$

Donde los parámetros variables ante una distorsión en la onda de Voltaje son:

F: Frecuencia

C: Capacitancia

kV: Voltaje del sistema

Dentro de un sistema eléctrico de una industria el comportamiento variará conforme la dinámica del sistema interno (el sistema eléctrico de la planta) y externo (la fuente).

Los fenómenos electromagnéticos más comunes son:

1. Factor de Potencia
2. Distorsión armónica
3. Sags
4. Transitorios tipo impulso
5. Desbalance

Los fenómenos mencionados afectan de la siguiente forma:

1. Desfase entre Voltaje y corriente (asociado con la **C**)
2. Frecuencia (f que se afecta con valores diferentes de 60)
3. Amplitud (**kV** afecta con la magnitud de su cuadrado)
4. Amplitud entre fases (**kV** afecta con la magnitud de su cuadrado)

De tal forma que:

Estas afectan el balance de la ecuación

$$kVA_r = 2\pi f C \times kV^2 \times 10^3$$

De manera que estos son los parámetros a corregir en el sistema, par obtener un sistema eficiente y de calida de la energía aceptable.

Pero si solo corregimos cada uno en forma individual caeremos en el problema de están directamente asociados y si la variación de uno no esta ligada a la el otro entraríamos en un juego dinámico con poco control.

Se podría exponer cada caso pero resultaría un documento mayor, así que iremos al grano.

El problema de los sags o regulación de voltaje:

Consiste en caídas repentinas de la magnitud del Voltaje con duraciones hasta de 3 seg. (según categorías de **IEEE Std.1159-1995**)

Una forma de evitarlo sería conteniendo una fuente que regule estos niveles de voltaje por esos periodos de duración.

El almacenamiento de energía reactiva es posible por medio de un capacitor o un inductor, expresado matemáticamente de la siguiente forma:

Para el capacitor

$$W_C = \frac{1}{2} QV$$

$$V_C = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt}$$

$$i_C = C \frac{dV}{dt}$$

Para el inductor

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2$$

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$i_L = C \frac{dV}{dt}$$

De las ecuaciones anteriores podemos deducir que por la naturaleza eléctrica que:

El capacitor carga y descarga abruptamente ante las variaciones de Voltaje fuera del nominal,

V nominal < V sistema: se carga

V nominal > V sistema: se descarga abruptamente

Y aumenta disminuye su reactancia X_C ante el aumento de la frecuencia:

$$X_C = 1 / 2\pi fC$$

El inductor aumenta o disminuye su Voltaje ante las variaciones abruptas de corriente, y aumenta su reactancia X_L ante el aumento de la frecuencia.

$$X_L = 2\pi fL$$

Con voltaje de carga y descarga de un capacitor dado por :

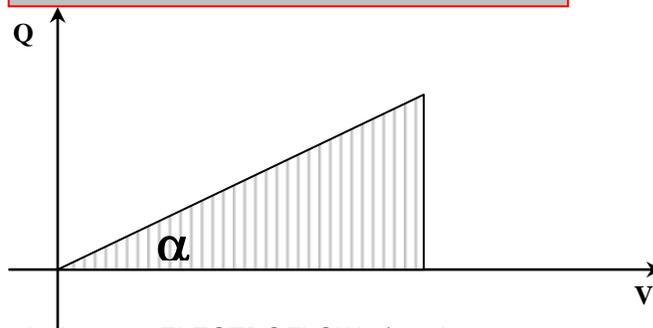
$$V_C = V_0 e^{-t/\tau}, \tau = RC$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

Naturaleza física del capacitor

$$C = \frac{Q}{V} = \text{Tang } \alpha$$

Naturaleza eléctrica del capacitor



Por lo tanto podemos decir que ELECTROFLOW (en lo consecuente EF) conjuga las características de cada elemento y le añade un factor de auto ajuste electromagnético, que reside en el seccionamiento del núcleo del reactor (inductor) ver figura 1 y 2 en **anexo 2 “Figuras y diagramas”**

Ahora nos concentraremos en las figuras citadas arriba para tratar de explicar la forma en que el sistema corrige varias distorsiones de la onda de Voltaje, pero enfatizando en los sags o regulación de Voltaje;

El embobinado del reactor está conectado en Zig-Zag, relacionando magnéticamente las fases A con B, B con C y C con A, primera cualidad que le asigna la función de que lo que suceda en una o varias fases generará efectos electromagnéticos en las otras de la siguiente manera:

Armónicas:

Las armónicas son atraídas al sistema EF debido a que la conexión delta en el punto central de la estrella Zig-Zag (ver figura 3 en **anexo 2 “Figuras y diagramas”**), proporciona una baja impedancia tanto por su conexión como por su reluctancia $X_c = 1/2 FC$, con la ventaja de que

antes de ingresar a los capacitores la relación entre fases logra inducir encada una armónica invertida (desfasada 30° por desplazamiento angular, para las armónicas de secuencia cero Triplen), que logra atenuar prácticamente a cero la magnitud de las armónicas triplen y en gran porcentaje las demás.

Regulación de Voltaje (sags, desbalances, transitorios):

La interacción entre fases mencionada en el párrafo anterior logra que las variaciones en una fase sean contrarestadas por efecto de la ley de Lenz, es decir que la inducción por la variación en una fase se contrapone al flujo normal a 60 Hz (frecuencia de diseño) logrando un equilibrio entre fases BALANCE, en el caso de una transiente (variación instantánea) debido a su alta frecuencia aplica una explicación similar que para las armónicas. En el caso de un bajo Voltaje permanente el efecto capacitivo e inductivo logran introducir un fasor que tiende a mantener el valor en su amplitud nominal (compensador), cuya característica de elevación de voltaje es bien conocida en el caso capacitivo (ver **anexo N° 1 "Marco teórico"**), En el caso de los sags bajos Voltajes instantáneos, momentáneos y temporales (según categorías de **IEEE Std.1159-1995**), la explicación es semejante a la anterior, pero se debe agregar que la característica que hace único al sistema EF, es el entrehierro del núcleo y cuyo funcionamiento tratare de explicar a continuación:

El entrehierro aumenta la capacidad de almacenamiento de energía en un inductor con núcleo de hierro que conjuntamente con la característica de los capacitores proporcionan un sistema de almacenamiento de energía que se usara para reinyección al sistema ante un evento de bajo de voltaje instantáneos, momentáneos y temporales y que con pedido especial hasta (cortes) interrupción sostenida (según categorías de **IEEE Std.1159-1995**) de hasta 1 seg.

La aplicación de este sistema se debe realizar en las proximidades de la carga a proteger con la finalidad de aprovechar las características de baja impedancia (alta corriente de corto circuito) como fuente de potencia reactiva (almacenada).

Anexo N° 2

“Figuras y Diagramas”

Figura 1: Distribución del embobinado

Figura 2: Conexión del embobinado y flujos magnéticos

Figura 3: Conexión LC, Reactor Capacitor

Diagrama 1: Configuración básica del sistema

Diagrama 2: Circuito tanque

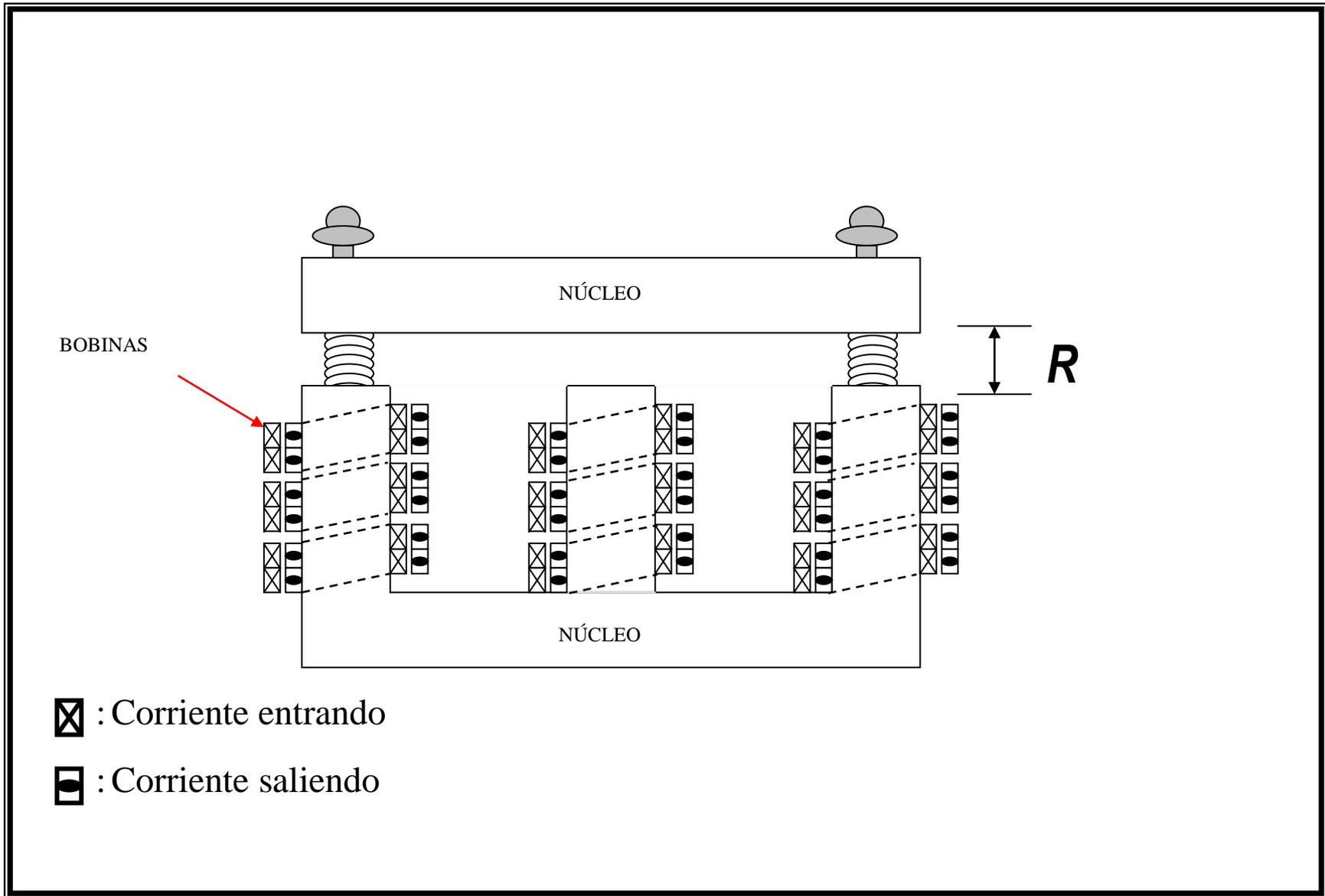


Figura 1:
Distribución del bobinado

Φ : Flujo magnético
⊗ : Corriente entrando
⊙ : Corriente saliendo

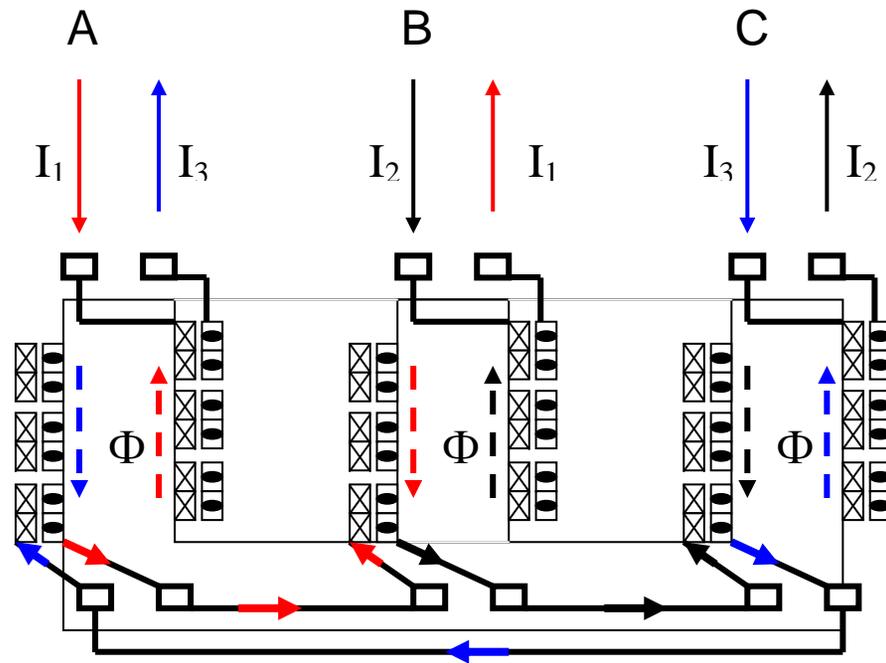


Figura 2:
Conexión del bobinado y flujos magnéticos y de corrientes

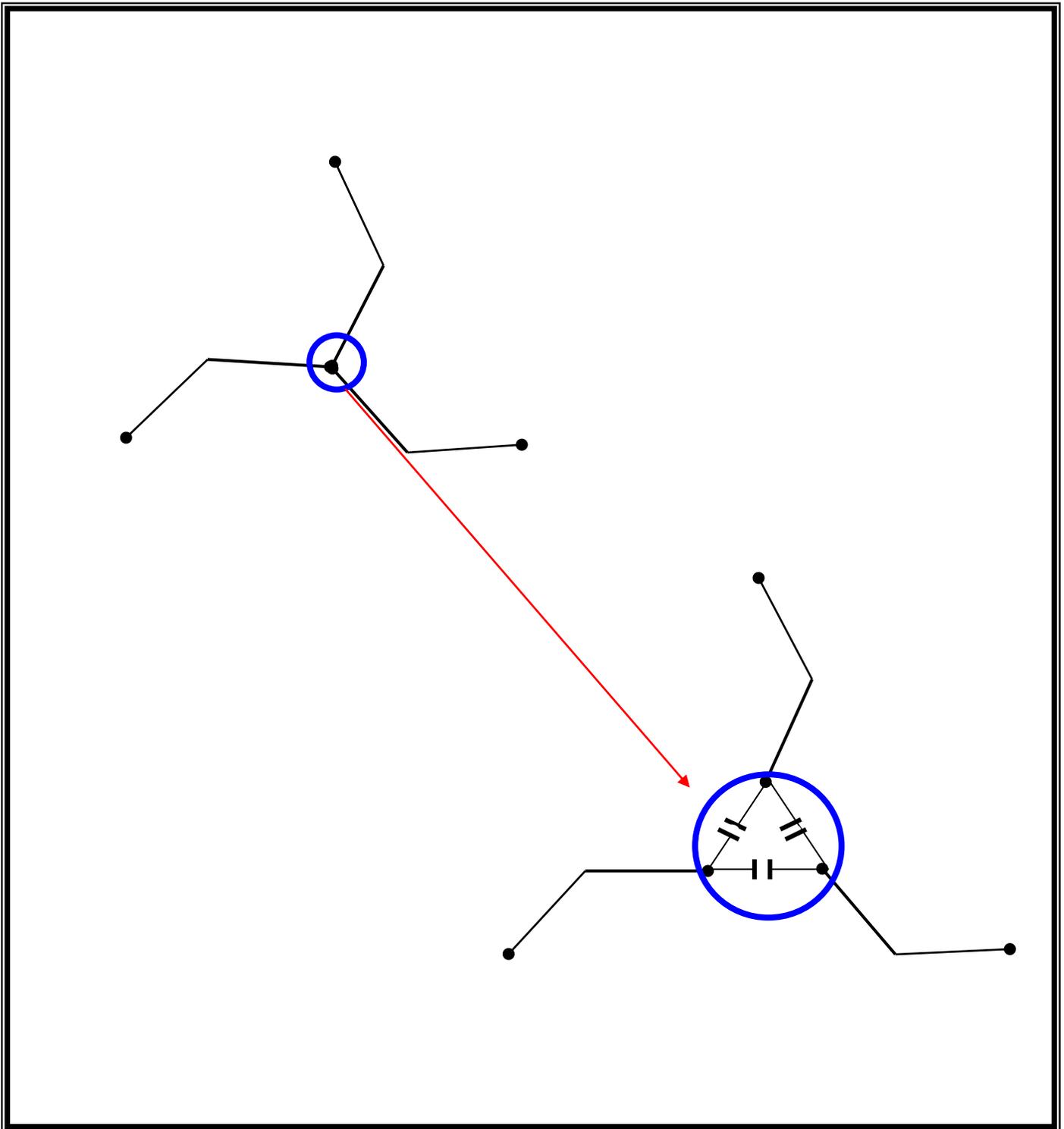
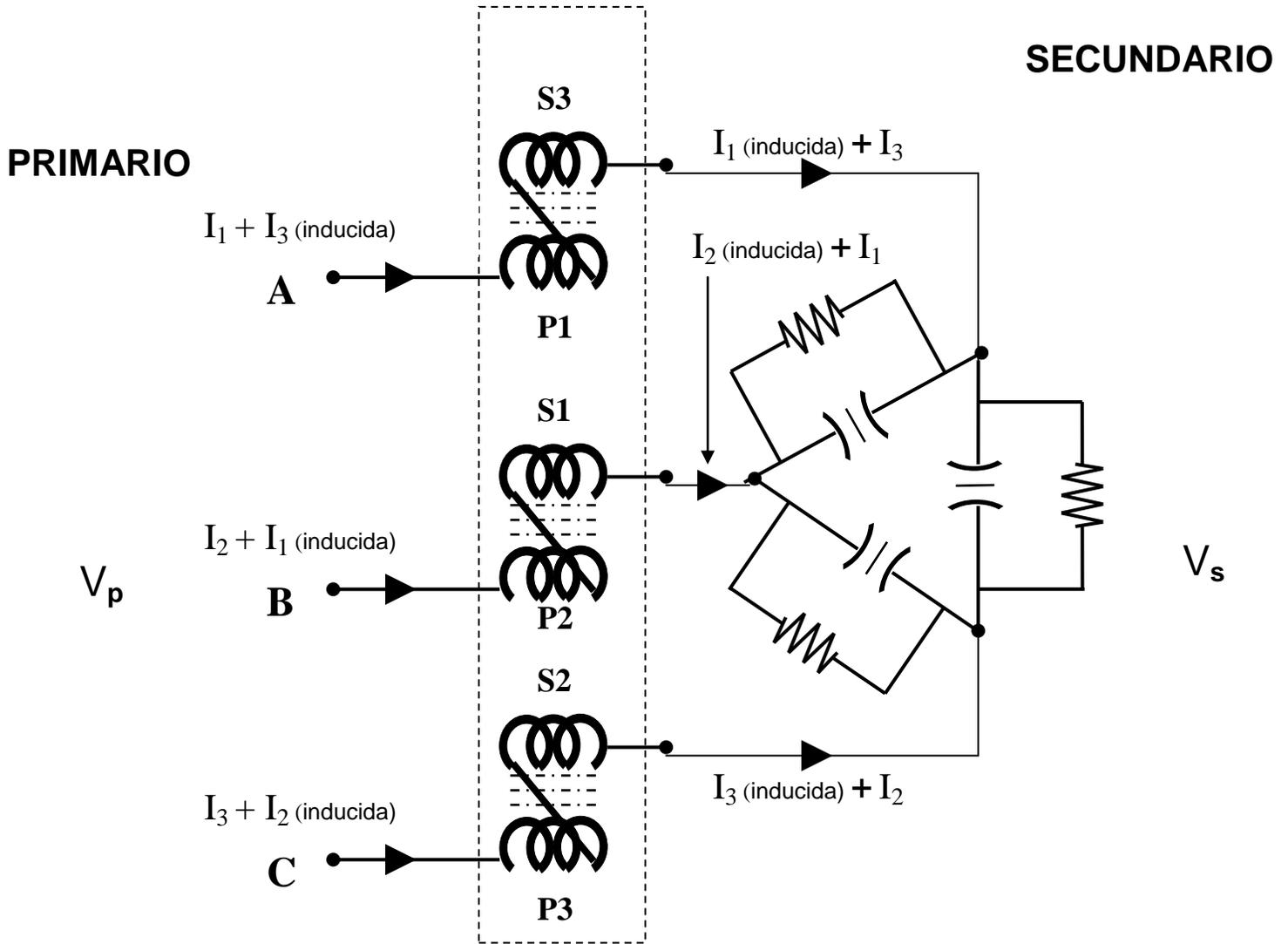


Figura 3:
Conexión LC, Ractor- Capacitor

Transformador de Voltaje constante



V_p : Voltaje primario

V_s : Voltaje secundario

ΔV_p : Variación de Voltaje primario,

(1) $V_p + \Delta V_p = V_s - \Delta V_p$

(2) $V_p - \Delta V_p = V_s + \Delta V_p$

Bobinas de compensación

S1

S2

S3

Diagrama N° 1: Configuración básica del sistema

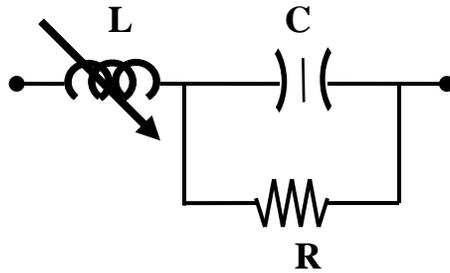


Diagrama N° 2: Circuito Tanque

Se debe
análisis se
considerando
contiene componentes simétricas y asimétricas.

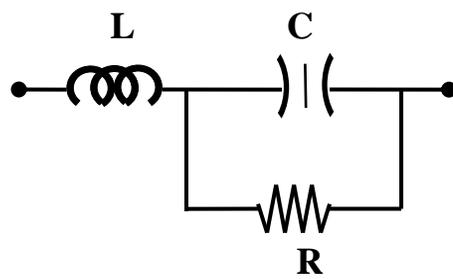
recordar que el
debe realizar
que el sistema

Y que algunas de las ecuaciones básicas son :

$$I = C \, dV/dt$$

$$V = L \, di/dt$$

$$I = I / 2 \square f \square V$$



Circuito Tanque

