

## **GRUPOS ELECTRÓGENOS DIESEL**

### **Cálculo de la Reactancia Transitoria y Tensión en los Terminales**

ÍNDICE	PÁG.
1 OBJETIVO.....	4
2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA.....	4
2.1 Planillas .....	4
3 CIRCUITO BÁSICOS .....	4
4 ALTERNADORES.....	5
4.1 Características .....	6
4.2 Tensiones .....	6
4.3 Impedancia del Alternador.....	6
4.4 Resistencia del Alternador.....	6
4.5 Reactancia Transitoria del Alternador .....	6
4.6 Ángulo de la Impedancia.....	6
4.7 Impedancia y Angulo.....	7
5 CARGAS DE POTENCIA CONSTANTE.....	7
5.1 Potencia de Carga Constante .....	8
5.2 Impedancia de la Carga Constante .....	8
5.3 Ángulo de la Impedancia de la Carga Constante.....	8
5.4 Corriente de la Carga Constante .....	8
6 CARGAS DE POTENCIA VARIABLE.....	9
6.1 Potencia de la Carga Variable.....	9
6.2 Impedancia de la Carga Variable .....	9
6.3 Ángulo de la Impedancia de a Carga Variable .....	10
6.4 Corriente de la Carga Variable.....	10
7 ARRANQUE DE MOTORES .....	10
7.1 Potencia de Arranque de Motores.....	10
7.2 Impedancia del(los) Motor(es) en el Arranque .....	11
7.3 Ángulo de la Impedancia del (de los) Motor(es) al Arrancar.....	11
7.4 Corriente en el Arranque del (de los) Motor(es).....	11
8 CONDICIONES DE OPERACIÓN ANALIZADAS.....	12
9 TENSIÓN EN EL ALTERNADOR .....	12
9.1 Tensión ( $V_G$ ) en el Alternador con Carga Inicial .....	13
9.2 Límite de la Tensión $V_G$ del Alternador.....	15
9.3 Tensión en los Terminales del Alternador al Aplicar Carga(s) .....	16
10 REACTANCIA TRANSITÓRIA DEL ALTERNADOR.....	20
11 PREPARACIÓN DE LAS PLANILLAS EXCEL .....	23
11.1 Planillas de Cálculo de la Reactancia Transitoria.....	24

ÍNDICE	PÁG.
11.2 Planillas de Cálculo de la Tensión en los Terminales .....	24
12 EJEMPLO COMENTADO DE APLICACIÓN .....	25
12.1 Ejemplo.....	25
12.2 Elección del Alternador.....	25
12.3 Tensiones en los Terminales del Alternador.....	27
12.4 Comentarios .....	28
12.5 Comentarios adicionales .....	29
12.5.1 Limitación de Tensión VG del Alternador.....	29
12.5.2 Compatibilidad de Informaciones y Valores.....	33

## 1 OBJETIVO

El objetivo de este informativo es analizar las condiciones de operación de alternadores de grupos electrógenos diésel, para calcular la reactancia transitoria del alternador que satisfaga las necesidades del sistema, y calcular la tensión en los terminales del alternador durante los periodos transitorios. En base a este análisis, serán elaboradas las planillas Excel para realizar los cálculos.

## 2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

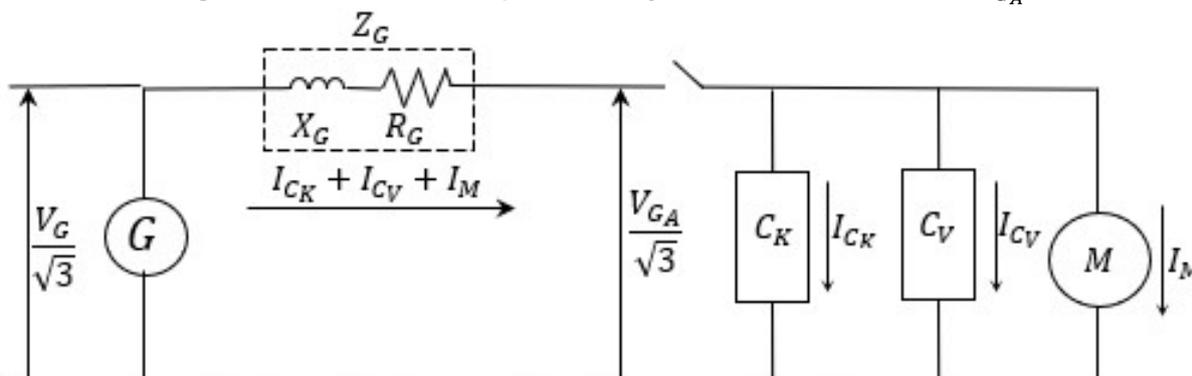
### 2.1 Planillas

PL.EL.SA.CA.02.R1 Grupos Electrógenos Diesel Cálculo de la Reactancia Transitoria

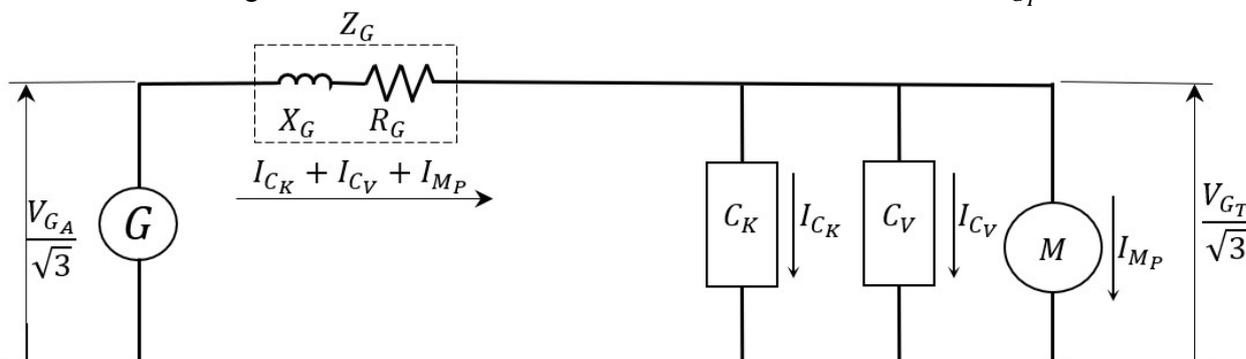
PL.EL.SA.CA.03.R1 Grupos Electrógenos Diesel Cálculo de la Tensión en los Terminales

## 3 CIRCUITO BÁSICOS

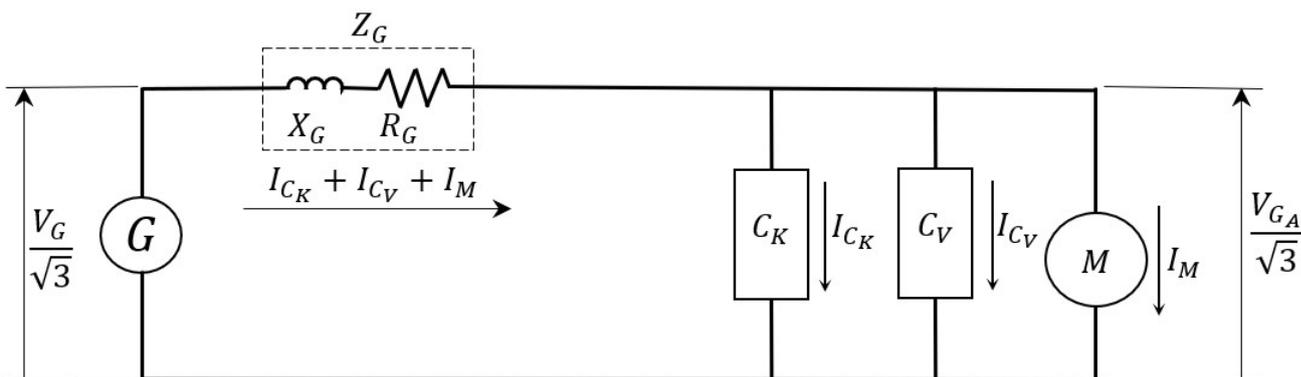
La figura siguiente representa el circuito de un alternador sin carga y los diversos tipos de cargas que se encuentran en la práctica. Las cargas pueden ser de potencia constante  $C_K$ , potencia variable  $C_V$  y motores de inducción  $M$ . Las cargas se aplicarán en conjunto o individualmente. Tener en cuenta que, en esta condición, como el generador está sin carga  $I_{C_K} + I_{C_V} + I_{M_P} = 0$ , no hay caída de tensión en el alternador. Por lo tanto, la tensión  $V_G$  del alternador es igual a la tensión de operación ajustado del alternador,  $V_{G_A}$ .



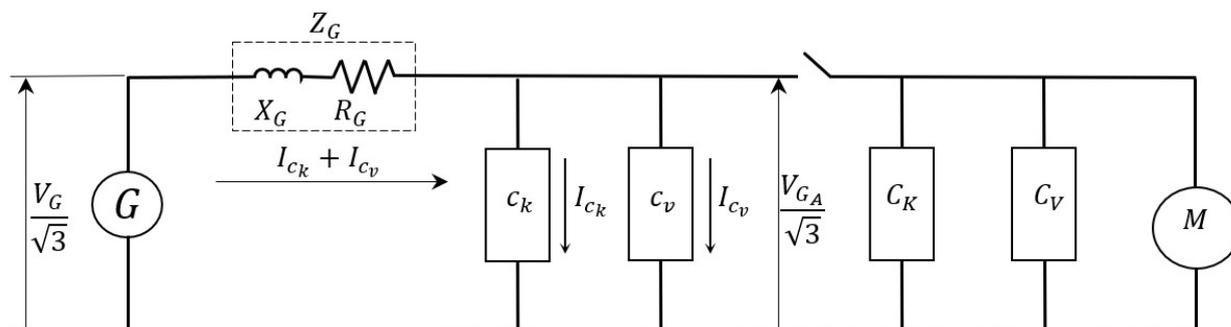
La figura siguiente representa el circuito en el instante de aplicación de la(s) carga(s), cuando la tensión en el alternador  $V_G$  es igual la tensión de operación ajustada  $V_{G_A}$  y la tensión en las cargas es la tensión en los terminales del alternador es  $V_{G_T}$ .



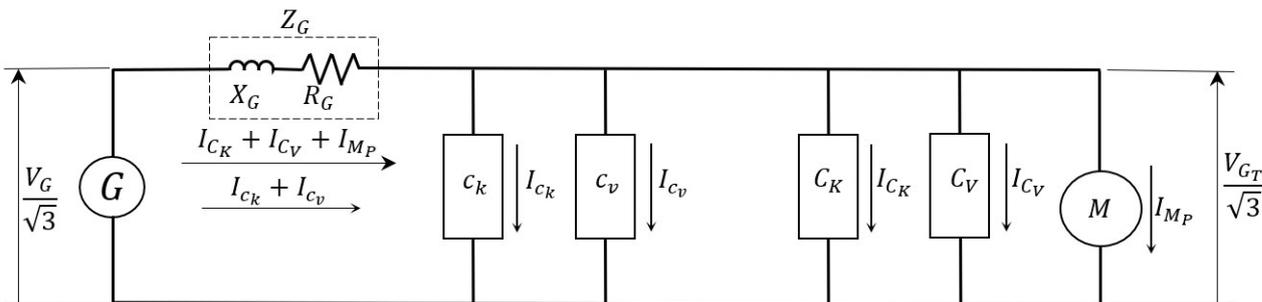
La figura siguiente representa el circuito del alternador, con tensión  $V_G$ , alimentando las cargas ya en funcionamiento normal. La tensión momentánea  $V_{G_T}$  es corregida, por el regulador de tensión, para la tensión de operación ajustada  $V_{G_A}$ , compensando la caída de tensión en la impedancia  $Z_G$  del alternador.



La figura siguiente representa el circuito de un alternador alimentando una carga inicial, y las cargas que se aplicarán, juntas o individualmente. Tener en cuenta que, en esta condición, el alternador tiene la tensión estabilizada en la tensión de operación ajustada  $V_{G_A}$ , en sus terminales y en la carga inicial. Por lo tanto, la tensión  $V_G$  del alternador dependerá de la carga inicial y la impedancia del alternador. En esta condición, la carga inicial, formada por motores de inducción, se incluye en la carga de potencia constante  $c_k$ .



La figura siguiente representa el circuito del alternador en el momento de la aplicación de las cargas  $C_K$ ,  $C_V$  y motor(es)  $M$ , cuando el alternador estaba alimentando una carga inicial compuesta de  $c_k$  y  $c_v$ . La tensión en los terminales del alternador, dependiendo de la aplicación de las cargas, pasará de  $V_{G_A}$  para  $V_{G_T}$ , lo que causará una variación en la corriente de las cargas que estaban operando.



Como la tensión  $V_{G_T}$  será menor que  $V_{G_A}$ , debido a la caída de tensión en la impedancia del alternador, la corriente en la carga constante  $c_k$  aumentará y la corriente en la carga variable  $c_v$  disminuirá. Por lo tanto, las corrientes  $I_{C_K} + I_{C_V}$  variarán, y la tensión en los terminales del alternador  $V_{G_T}$  será una función de las corrientes  $I_{C_K} + I_{C_V} + I_{M_P} + I_{c_k} + I_{c_v}$ .

#### 4 ALTERNADORES

Los alternadores suelen ser de 4 polos, dependiendo de la aplicación y rotación de los motores diésel de emergencia más utilizados, con sistema de excitación estática brushless. La tensión nominal de los alternadores depende de la tensión del sistema asociado, la

potencia depende de las necesidades de las cargas a satisfacer y la reactancia transitoria depende de la caída de tensión admisible en las cargas alimentadas.

#### 4.1 Características

Las características del alternador que se utilizarán son:

- $P_{G_n}$  Potencia nominal del alternador (VA)
- $V_{G_n}$  Tensión nominal del alternador (V)
- $V_{G_A}$  Tensión de operación ajustada (V)
- $Z_{G_n}$  Impedancia nominal del alternador (%)
- $X'_{G_n}$  Reactancia transitoria nominal del alternador (%)

#### 4.2 Tensiones

La tensión en los terminales del alternador depende del ajuste definido por el usuario, ya que el sistema de regulación de tensión tiene un rango de ajuste para este propósito. La tensión en los terminales del alternador se mantiene constante durante el funcionamiento del grupo de electrógeno diésel, en la tensión de operación ajustada  $V_{G_A}$ , variando solo en los períodos transitorios, cuando se aplican o suprimen cargas. La tensión de operación ajustada  $V_{G_A}$  es controlada por el sistema de regulación de tensión.

La tensión nominal del alternador  $V_{G_n}$  suele ser igual la tensión nominal del sistema asociado.

La tensión de operación ajustado del alternador  $V_{G_A}$  puede ser igual o diferente de la tensión nominal  $V_{G_n}$ , pero dentro del rango de ajuste del regulador.

#### 4.3 Impedancia del Alternador

La impedancia del alternador  $Z_G$ , que se considerará en este documento para calcular la caída de tensión, será:

$$Z_G = \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{Z_{G_n}}{100}$$

#### 4.4 Resistencia del Alternador

La resistencia ( $R_G$ ) del alternador será:

$$R_G = \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{R_{G_n}}{100}$$

#### 4.5 Reactancia Transitoria del Alternador

La reactancia transitoria del alternador ( $X'_G$ ) será:

$$X'_G = \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100}$$

#### 4.6 Ángulo de la Impedancia

El ángulo de la impedancia será:

$$\theta_G = \arctan \frac{X_G}{R_G}$$

Si:

$$R_G = 0$$

$$\theta_G = \arccos 0$$

#### 4.7 Impedancia y Angulo

Como la impedancia del alternador, para los cálculos de este documento, se considerará igual a la reactancia transitoria, la impedancia y el ángulo considerados serán:

$$Z_G = X'_G = \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100}$$

$$\theta_G = \arccos 0$$

Dónde:

$Z_G$  Impedancia del alternador ( $\Omega$ )

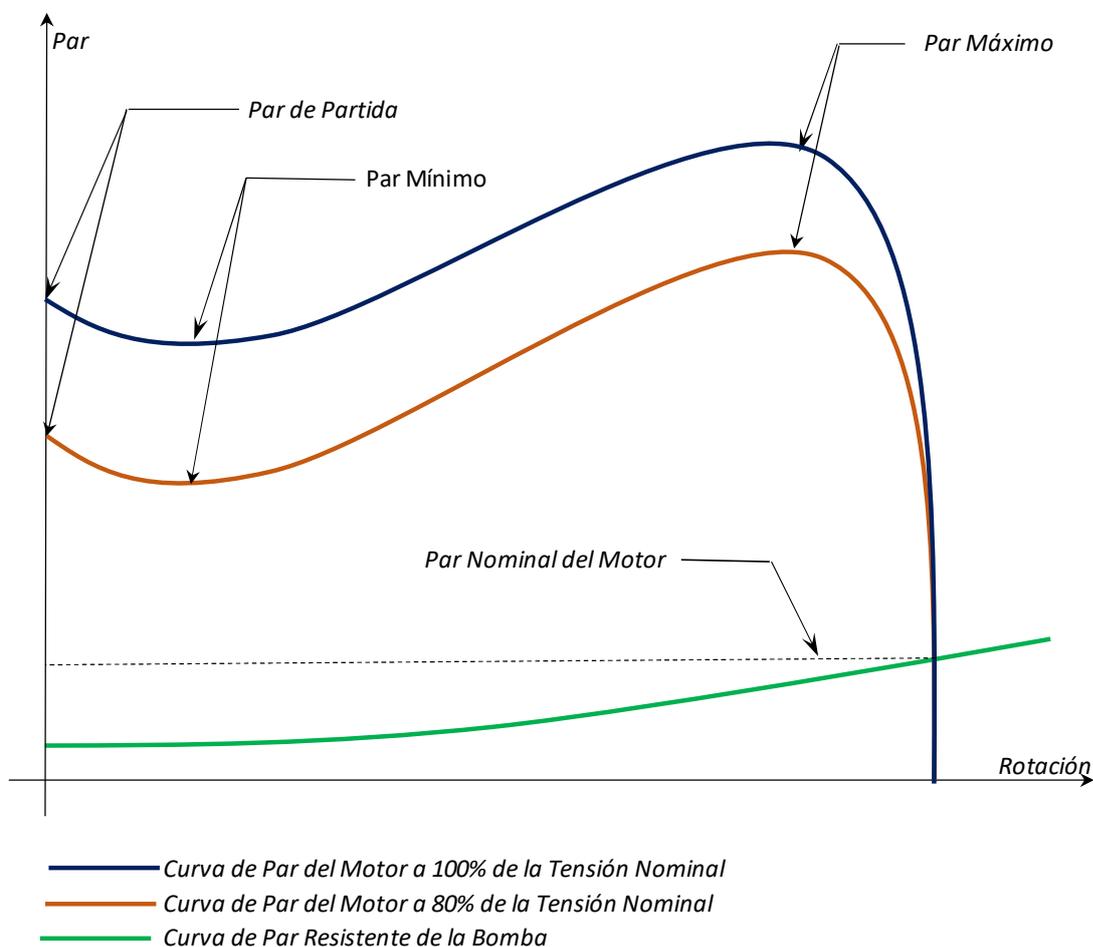
$V_{G_n}$  Tensión nominal del alternador (V)

$P_{G_n}$  Potencia nominal del alternador (VA)

$X'_{G_n}$  Reactancia transitoria nominal del alternador (%)

### 5 CARGAS DE POTENCIA CONSTANTE

En cargas de potencia constante, la corriente varía dependiendo de la tensión para mantener una potencia constante. En este caso se encuentran, por ejemplo, cargadores de baterías, sistemas de comunicación y, principalmente, motores de inducción. Los motores de inducción tienen la característica de mantener la rotación prácticamente constante con la variación de tensión (ver figura a continuación).



$Potencia = Fuerza \times Velocidad$  o  $Potencia = Par \times Velocidad Angular$

Tener en cuenta que el par del motor varía durante el arranque del motor y es diferente para cada valor de tensión, pero el par y la rotación permanecen constantes durante el funcionamiento. Por lo tanto, como la carga (Fuerza o Par) y la velocidad permanecen constantes, la Potencia también permanece constante, es decir, la variación de corriente es inversamente proporcional a la variación de tensión.

### 5.1 Potencia de Carga Constante

La potencia de la carga constante en el circuito viene dada por:

$$P_{C_K} = \frac{V_{G_T}^2}{Z_{C_K}}$$

Dónde:

$P_{C_K}$  - Potencia de carga constante (VA)

$V_{G_T}$  – Tensión en los terminales de alternador (V)

$Z_{C_K}$  – Impedancia de la carga constante ( $\Omega$ )

En carga constante la potencia es constante, e igual a la potencia nominal de la carga, es decir:

$$P_{C_{Kn}} = \frac{V_{C_{Kn}}^2}{Z_{C_{Kn}}}$$

Dónde:

$P_{C_{Kn}}$  - Potencia nominal de la carga constante (VA)

$V_{C_{Kn}}$  – Tensión nominal de la carga constante (V)

$Z_{C_{Kn}}$  – Impedancia nominal de la carga constante ( $\Omega$ )

### 5.2 Impedancia de la Carga Constante

Como la potencia de carga es constante:

$$Z_{C_K} = \frac{V_{G_T}^2}{P_{C_{Kn}}}$$

### 5.3 Ángulo de la Impedancia de la Carga Constante

Como el factor de potencia de la carga suele ser un valor arbitrado, por ejemplo, igual a 0,85.

$$\theta_{C_K} = \arccos(FP_{C_K})$$

Dónde:

$FP_{C_K}$  Factor de potencia de la carga constante

### 5.4 Corriente de la Carga Constante

Cómo:

$$\vec{I}_{C_K} = \frac{\vec{V}_{G_T}}{\vec{Z}_{C_K}}$$

$$\vec{I}_{C_K} = \frac{\left(\frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}, 0\right)}{\left(Z_{C_K}, \theta_{C_K}\right)}$$

$$\vec{I}_{C_K} = \left( \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}}, -\theta_{C_K} \right)$$

Pero cómo,

$$Z_{C_K} = \frac{V_{G_T}^2}{P_{C_{Kn}}}$$

$$\vec{I}_{C_K} = \left( \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3} \frac{V_{G_T}^2}{P_{C_{Kn}}}}, -\theta_{C_K} \right)$$

$$\vec{I}_{C_K} = \left( \frac{P_{C_{Kn}}}{\sqrt{3}V_{G_T}}, -\theta_{C_K} \right)$$

## 6 CARGAS DE POTENCIA VARIABLE

En cargas de potencia variable la impedancia es un valor constante. Por lo tanto, la variación de la tensión hace que la corriente varíe en función de la impedancia de la carga. En este caso, podemos considerar, por ejemplo, cargas compuestas por transformadores, reactores y resistencias. En estas cargas la corriente es directamente proporcional a la variación de tensión.

### 6.1 Potencia de la Carga Variable

En carga de potencia variable tenemos:

$$P_{C_V} = \frac{V_{G_T}^2}{Z_{C_V}}$$

Dónde:

$P_{C_V}$  Potencia de la carga variable (VA)

$V_{G_T}$  Tensión en los terminales del alternador durante el período transitorio (V)

$Z_{C_V}$  Impedancia de la carga variable ( $\Omega$ )

La potencia nominal de la carga variable es:

$$P_{C_{Vn}} = \frac{V_{C_{Vn}}^2}{Z_{C_{Vn}}}$$

### 6.2 Impedancia de la Carga Variable

La carga es variable porque la impedancia es constante, por ejemplo, resistencia. Luego:

$$Z_{C_V} = Z_{C_{Vn}}$$

$$Z_{C_V} = Z_{C_{Vn}} = \frac{V_{C_{Vn}}^2}{P_{C_{Vn}}}$$

$$Z_{C_V} = \frac{V_{C_{Vn}}^2}{P_{C_{Vn}}}$$

Dónde:

$P_{C_{Vn}}$  Potencia nominal de la carga variable (VA)

$V_{C_{Vn}}$  Tensión nominal de la carga variable (V)

$Z_{CVn}$  Impedancia nominal de la carga variable ( $\Omega$ )

### 6.3 Ángulo de la Impedancia de a Carga Variable

El factor de potencia de la carga variable puede ser arbitrado o conocido. Por ejemplo, si es una resistencia el factor de potencia es 1.

$$\theta_{CV} = \text{arc cos}(FP_{CV})$$

Dónde:

$FP_{CV}$  Factor de potencia de la carga variable

### 6.4 Corriente de la Carga Variable

Cómo:

$$I_{CV} = \frac{V_{GT}}{\sqrt{3} Z_{CV}}$$

Pero,

$$Z_{CV} = \frac{V_{CVn}^2}{P_{CVn}}$$

$$I_{CV} = \frac{V_{GT}}{\sqrt{3} \frac{V_{CVn}^2}{P_{CVn}}}$$

$$I_{CV} = \frac{P_{CVn} V_{GT}}{\sqrt{3} V_{CVn}^2}$$

$$\vec{I}_{CV} = \left( \frac{P_{CVn} V_{GT}}{\sqrt{3} V_{CVn}^2}, -\theta_{CV} \right)$$

## 7 ARRANQUE DE MOTORES

En cargas compuestas por arranque de motor(es), la impedancia del (de los) motor(es) en el momento de arranque es fija. Sin embargo, debido a que es una condición transitoria de la carga, se la tratará de manera diferente.

### 7.1 Potencia de Arranque de Motores

En el arranque del (de los) motor(es), la impedancia del (de los) motor(es) es fija. Por lo tanto, su comportamiento es el mismo que el de cargas con potencia variable.

$$P_{MP} = \frac{V_{GT}^2}{Z_{MP}}$$

Dónde:

$P_{MP}$  Potencia del (de los) motor(es) en el arranque (VA)

$V_{GT}$  Tensión en los terminales del alternador durante el período transitorio (V)

$Z_{MP}$  Impedancia del (de los) motor(es) en el arranque ( $\Omega$ )

La potencia nominal del (de los) motor(es) al arrancar es:

$$P_{MPn} = \frac{V_{MPn}^2}{Z_{MPn}}$$

Dónde:

$P_{MPn}$  Potencia nominal del (de los) motor(es) en el arranque (VA)

$V_{MPn}$  Tensión nominal del (de los) motor(es) (V)

$Z_{MPn}$  Impedancia nominal del (de los) motor(es) en el arranque ( $\Omega$ )

## 7.2 Impedancia del(los) Motor(es) en el Arranque

Como la impedancia del (de los) motor(es) al arrancar es un valor fijo:

$$Z_{MP} = Z_{MPn}$$

$$Z_{MP} = Z_{MPn} = \frac{V_{MPn}^2}{P_{MPn}}$$

Como la potencia de arranque nominal no es un dato proporcionado en las tablas de los fabricantes, utilizaremos la corriente de arranque nominal, es decir:

$$P_{MPn} = \sqrt{3}V_{MPn} \cdot I_{MPn}$$

O:

$$Z_{MP} = \frac{V_{MPn}}{\sqrt{3}I_{MPn}}$$

$$Z_{MP} = \frac{V_{MPn}}{\sqrt{3}I_{MPn}}$$

Dónde:

$P_{MPn}$  Potencia nominal del (de los) motor(es) en el arranque (VA)

$V_{MPn}$  Tensión nominal del (de los) motor(es) (V)

$I_{MPn}$  Corriente de arranque del (de los) motor(es) a la tensión nominal (A)

## 7.3 Ángulo de la Impedancia del (de los) Motor(es) al Arrancar

El valor o valores del factor de potencia del (de los) motor(es) en el arranque pueden estimarse según los datos del motor. Así que:

$$\theta_{MP} = \arccos(FP_{MP})$$

Dónde:

$FP_{MP}$  Factor de potencia del (de los) motor(es) en el arranque

## 7.4 Corriente en el Arranque del (de los) Motor(es)

Cómo:

$$\vec{I}_{MP} = \frac{\vec{V}_{GT}}{Z_{MP}}$$

$$\vec{I}_{MP} = \frac{\left(\frac{V_{GT}}{\sqrt{3}}, 0\right)}{(Z_{MP}, \theta_{MP})}$$

$$\vec{I}_{MP} = \left( \frac{V_{GT}}{\sqrt{3}Z_{MP}}, -\theta_{MP} \right)$$

Pero cómo,

$$Z_{MP} = \frac{V_{MPn}}{\sqrt{3}I_{MPn}}$$

$$\vec{I}_{MP} = \left( \frac{I_{MPn}V_{GT}}{V_{MPn}}, -\theta_{MP} \right)$$

## 8 CONDICIONES DE OPERACIÓN ANALIZADAS

En el régimen de funcionamiento permanente de los alternadores, el sistema de regulación de tensión mantiene automáticamente la tensión en el valor de tensión ajustado  $V_{GA}$ , siempre que la carga esté dentro de los límites de la capacidad del alternador.

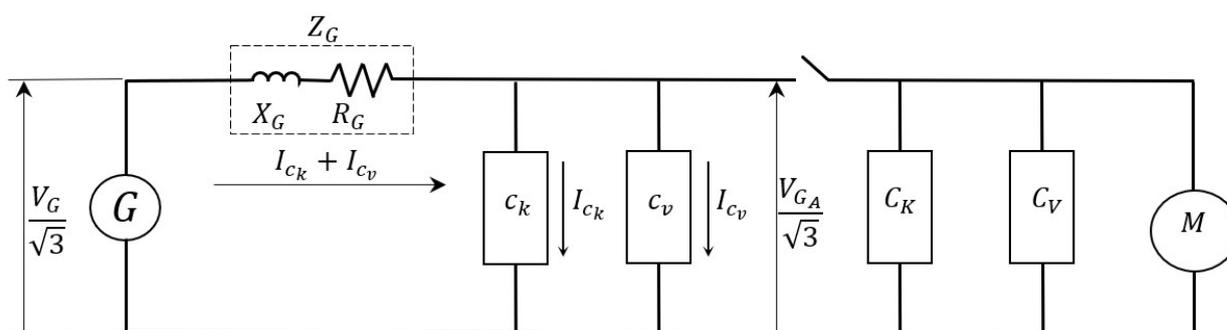
Durante el período transitorio de la alimentación de una carga o conjunto de cargas (con o sin arranque del motor), se tendrán en cuenta las variaciones de tensión en el alternador. Las condiciones de funcionamiento que se analizarán son:

- Con la aplicación de la carga cuando el alternador está vacío (sin carga);
- Con la aplicación de la carga cuando el alternador está a una carga inicial.

La presentación de los cálculos se realiza en detalle para permitir la perfecta comprensión de la secuencia y los conceptos adoptados, que pueden ser utilizados en el desarrollo de otras aplicaciones. Para seguir el desarrollo, el usuario solo debe tener conocimiento de números complejos, en la forma trigonométrica y polar, además, por supuesto, electrotécnica.

## 9 TENSIÓN EN EL ALTERNADOR

El cálculo de la tensión en el alternador se realizará para cumplir con cualquier condición de funcionamiento y cualquier condición de carga.



Para el cálculo de la tensión  $V_G$ , del alternador se considerará una figura del circuito anterior, donde:

- $V_G$  Tensión en el alternador (V)
- $V_{GA}$  Tensión de operación ajustada en el alternador (V)
- $c_k$  Carga inicial constante (VA)
- $c_v$  Carga inicial variable (VA)
- $I_{c_k}$  Corriente de la carga inicial constante (A)

$I_{c_v}$	Corriente de la carga inicial variable (A)
$Z_G$	Impedancia del alternador ( $\Omega$ )
$R_G$	Resistencia del alternador ( $\Omega$ )
$X_G$	Reactancia del alternador ( $\Omega$ )
$C_K$	Carga constante (VA)
$C_V$	Carga variable (VA)
$M$	Corriente(s) del motor (A)

El alternador está alimentando una carga constante  $c_k$  y una variable  $c_v$ . En esta condición de funcionamiento, la tensión  $V_{G_A}$  en los terminales del alternador se mantiene constante mediante el regulador automático de voltaje.

En el caso de aplicación de nueva(s) carga(s), constantes  $C_K$ , variables  $C_V$ , o arranque de motor(es)  $M$ , la tensión  $V_{G_A}$  en los terminales del alternador cambiará, transitoriamente, hasta que el regulador corrija la tensión al valor de la tensión ajustado  $V_{G_A}$ .

### 9.1 Tensión ( $V_G$ ) en el Alternador con Carga Inicial

En esta condición, las cargas formadas por conjunto de motores de inducción están incluidas en las cargas de potencia constante  $c_k$ .

Cuando el alternador alimenta las cargas, la tensión en sus terminales será  $V_{G_A}$  e implicará que la tensión  $V_G$  del alternador vendrá dada por la fórmula:

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \frac{\vec{V}_{G_A}}{\sqrt{3}} + \vec{Z}_G(\vec{I}_{c_k} + \vec{I}_{c_v})$$

Mientras que:

$$\frac{\vec{V}_{G_A}}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, j0 \right)$$

$$\vec{Z}_G = \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100}, \text{arc cos } 0 \right)$$

$$\vec{Z}_G = \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100}, 90 \right)$$

De manera similar a las cargas  $C_K$  y  $C_V$ , se adoptarán los mismos criterios, es decir, en forma polar:

$$\frac{\vec{V}_{G_A}}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, 0 \right)$$

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{P_{G_n} 100}, 90 \right) \left( \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, 0 \right) \right) + \left( \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, 0 \right) \right)$$

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{P_{G_n} 100}, 90 \right) \left( \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3} Z_{c_k}}, -\theta_{c_k} \right) + \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3} Z_{c_v}}, -\theta_{c_v} \right) \right)$$

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{P_{G_n} 100}, 90 \right) \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3} Z_{c_k}}, -\theta_{c_k} \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{P_{G_n} 100}, 90 \right) \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3} Z_{c_v}}, -\theta_{c_v} \right)$$

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} Z_{c_k}}, (90 - \theta_{c_k}) \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} Z_{c_v}}, (90 - \theta_{c_v}) \right)$$

En forma de complejos tenemos:

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + j0 + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} Z_{c_k}} \cos(90 - \theta_{c_k}) +$$

$$+ j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} Z_{c_k}} \operatorname{sen}(90 - \theta_{c_k}) + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} Z_{c_v}} \cos(90 - \theta_{c_v}) +$$

$$+ j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} Z_{c_v}} \operatorname{sen}(90 - \theta_{c_v})$$

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{100 \sqrt{3} Z_{c_k} P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{c_k}) + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{100 \sqrt{3} Z_{c_v} P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{c_v}) +$$

$$+ j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{100 \sqrt{3} Z_{c_k} P_{G_n}} \operatorname{sen}(90 - \theta_{c_k}) + j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} Z_{c_v}} \operatorname{sen}(90 - \theta_{c_v})$$

Reemplazando  $Z_{c_k} = \frac{V_{G_A}^2}{P_{c_{kn}}}$ ,  $Z_{c_v} = \frac{V_{c_{vn}}^2}{P_{c_{vn}}}$  y cómo  $\cos(90 - \theta) = \operatorname{sen}\theta$  e  $\operatorname{sen}(90 - \theta) = \cos\theta$  tenemos:

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{100 \sqrt{3} \frac{V_{G_A}^2}{P_{c_{kn}}} P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_k} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{100 \sqrt{3} \frac{V_{c_{vn}}^2}{P_{c_{vn}}} P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_v} + j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{100 \sqrt{3} \frac{V_{G_A}^2}{P_{c_{kn}}} P_{G_n}} \cos\theta_{c_k} +$$

$$+ j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A}}{P_{G_n} 100 \sqrt{3} \frac{V_{c_{vn}}^2}{P_{c_{vn}}}} \cos\theta_{c_v}$$

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{c_{kn}}}{100 \sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_k} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{c_{vn}}}{100 \sqrt{3} V_{c_{vn}}^2 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_v} + j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{c_{kn}}}{100 \sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} \cos\theta_{c_k} +$$

$$+ j \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{c_{vn}}}{100 \sqrt{3} V_{c_{vn}}^2 P_{G_n}} \cos\theta_{c_v}$$

$$\left| \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} \right|^2 = \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{c_{kn}}}{100 \sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_k} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{c_{vn}}}{100 \sqrt{3} V_{c_{vn}}^2 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_v} \right]^2 +$$

$$+ \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{c_{kn}}}{100 \sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} \cos\theta_{c_k} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{c_{vn}}}{100 \sqrt{3} V_{c_{vn}}^2 P_{G_n}} \cos\theta_{c_v} \right]^2$$

La fórmula anterior permite calcular la tensión  $V_G$  del alternador, cuando el alternador alimenta una carga inicial de potencia constante y/o variable, por la fórmula:

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

## 9.2 Límite de la Tensión $V_G$ del Alternador

La aplicación de cargas en un grupo generador diésel de emergencia depende del operador del equipo, que debe cumplir con las limitaciones de sobrecarga establecidas por los fabricantes del alternador y motor diésel. Por lo tanto, estas cargas podrían exceder la potencia nominal del alternador. Si la potencia de las cargas aplicadas excede los valores permitidos, puede producirse un calentamiento excesivo del alternador y/o una caída de frecuencia debido a la reducción de la velocidad del motor diésel y/o a la pérdida del control de regulación de tensión.

Para cualquier valor de carga, incluso si son muy superiores a la potencia nominal del alternador, si no se establece ningún límite para el valor  $V_G$  de la tensión del alternador, la tensión en los terminales se mantendría constante en el valor ajustado  $V_{G_A}$ , lo que no ocurre debido a las limitaciones del regulador de tensión y los componentes asociados al grupo.

Para establecer el valor máximo de tensión  $V_G$ , se considerará que el alternador proporciona continuamente la potencia nominal, con un factor de potencia de 0,8 en la tensión  $V_{G_A}$  ajustada.

Considerando la siguiente fórmula del cálculo de tensión  $V_G$ :

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dónde:

$$P_{c_{kn}} = P_{G_n}$$

$$\text{cos } \theta_{c_k} = 0,8 \text{ lo que implica que } \text{sen } \theta_{c_k} = 0,6$$

$$P_{c_{vn}} = 0$$

Aunque la carga inicial puede estar compuesta por cargas de potencia constantes o variables, no se consideró la carga variable, ya que varía según el cuadrado de la variación de voltaje. Por lo tanto, si el valor de voltaje ajustado  $V_{G_A}$  es diferente de la tensión nominal del alternador, la potencia solicitada por la carga variable, incluso si su tensión nominal es igual a la del alternador, será diferente de la potencia nominal del alternador. Por ejemplo, si el valor de tensión ajustado es del 110% de la tensión nominal del alternador, la potencia solicitada por una carga variable, con tensión nominal y potencia igual a la del alternador, será del 121% de la potencia nominal de la carga variable, lo que comprometería el concepto aquí adoptado, a menos que se considerase una carga con potencia variable del 82,64% (100/121) de la potencia nominal del alternador en lugar del 100%.

Por lo tanto, la tensión máxima considerada para  $V_G$  será:

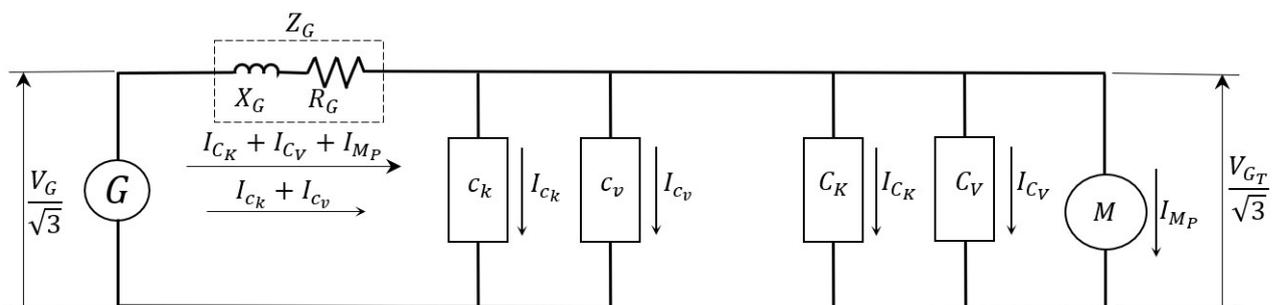
$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{0,6P_{G_n}}{V_{G_A}} + \frac{0 \cdot V_{G_A} \text{sen} \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{0,8P_{G_n}}{V_{G_A}} + \frac{0 \cdot V_{G_A} \text{cos} \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6P_{G_n} V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n} V_{G_A}} \right]^2 + \left[ \frac{0,8P_{G_n} V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n} V_{G_A}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left[ \frac{0,8V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

El valor de la tensión  $V_G$  del alternador corresponderá al valor de la tensión  $V_{G_A}$  de operación ajustada .

### 9.3 Tensión en los Terminales del Alternador al Aplicar Carga(s)



La figura anterior representa el circuito del alternador, que estaba alimentando una carga inicial compuesta por  $c_k$  y  $c_v$ , en el instante de la aplicación de las cargas  $C_K$ ,  $C_V$  y motor  $M$ . La tensión en los terminales del alternador, dependiendo de la aplicación de las cargas  $C_K$ ,  $C_V$  y el motor  $M$ , pasará de  $V_{G_A}$  a  $V_{G_T}$ , que provocará una variación en las corrientes  $I_{c_k}$  y  $I_{c_v}$  de las cargas que estaban operando, pero la tensión  $V_G$  en el alternador será, transitoriamente, la misma tensión que cuando alimentaba solo las cargas iniciales  $c_k$  e  $c_v$ . Como la tensión  $V_{G_T}$  será menor que  $V_{G_A}$ , debido a la caída de tensión en la impedancia del alternador, la corriente a carga constante  $c_k$  aumentará y la corriente en la carga variable  $c_v$  disminuirá. Por lo tanto, la tensión en los terminales del alternador  $V_{G_T}$  será función de las corrientes  $I_{C_K} + I_{C_V} + I_{M_P} + I_{c_k} + I_{c_v}$  y de la tensión  $V_G$ .

$$\frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} = \frac{\vec{V}_{G_T}}{\sqrt{3}} + \vec{Z}_G (\vec{I}_{C_K} + \vec{I}_{C_V} + \vec{I}_{M_P} + \vec{I}_{c_k} + \vec{I}_{c_v})$$

Dónde:

$$\frac{\vec{V}_{G_T}}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right)$$

$$\vec{Z}_G = \left( \frac{V_{G_n}^2 \cdot X'_{G_n}}{P_{G_n} \cdot 100}, 90 \right)$$

$$\vec{I}_{C_K} = \left( \frac{P_{C_{Kn}}}{\sqrt{3}V_{G_T}}, -\theta_{C_K} \right)$$

$$\vec{I}_{C_k} = \left( \frac{P_{c_{kn}}}{\sqrt{3}V_{G_T}}, -\theta_{C_k} \right)$$

$$\vec{I}_{M_P} = \left( \frac{I_{M_{Pn}}V_{G_T}}{V_{M_{Pn}}}, -\theta_{M_P} \right)$$

$$\vec{I}_{C_V} = \left( \frac{P_{C_{Vn}}V_{G_T}}{\sqrt{3}V_{C_{Vn}}^2}, -\theta_{C_V} \right)$$

$$\vec{I}_{c_v} = \left( \frac{P_{c_{vn}}V_{G_T}}{\sqrt{3}V_{c_{vn}}^2}, -\theta_{c_v} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} &= \left( \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100}, 90 \right) \left( \left( \frac{P_{C_{Kn}}}{\sqrt{3}V_{G_T}}, -\theta_{C_K} \right) + \left( \frac{P_{C_{Vn}}V_{G_T}}{\sqrt{3}V_{C_{Vn}}^2}, -\theta_{C_V} \right) + \right. \\ &+ \left. \left( \frac{I_{M_{Pn}}V_{G_T}}{V_{M_{Pn}}}, -\theta_{M_P} \right) + \left( \frac{P_{c_{kn}}}{\sqrt{3}V_{G_T}}, -\theta_{C_k} \right) + \left( \frac{P_{c_{vn}}V_{G_T}}{\sqrt{3}V_{c_{vn}}^2}, -\theta_{c_v} \right) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} &= \left( \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Kn}}}{\sqrt{3}V_{G_T}}, (90 - \theta_{C_K}) \right) + \right. \\ &+ \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Vn}}V_{G_T}}{\sqrt{3}V_{C_{Vn}}^2}, (90 - \theta_{C_V}) \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{I_{M_{Pn}}V_{G_T}}{V_{M_{Pn}}}, (90 - \theta_{M_P}) \right) + \\ &+ \left. \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{c_{kn}}}{\sqrt{3}V_{G_T}}, (90 - \theta_{C_k}) \right) + \left( \frac{V_{G_n}^2}{P_{G_n}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{c_{vn}}V_{G_T}}{\sqrt{3}V_{c_{vn}}^2}, (90 - \theta_{c_v}) \right) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} &= \left( \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \left( \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Kn}}}{P_{G_n}}, (90 - \theta_{C_K}) \right) + \right. \\ &+ \left( \frac{V_{G_T}V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Vn}}}{P_{G_n}}, (90 - \theta_{C_V}) \right) + \left( \frac{V_{G_T}V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{I_{M_{Pn}}}{P_{G_n}}, (90 - \theta_{M_P}) \right) + \\ &+ \left. \left( \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{c_{kn}}}{P_{G_n}}, (90 - \theta_{C_k}) \right) + \left( \frac{V_{G_T}V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{c_{vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{c_{vn}}}{P_{G_n}}, (90 - \theta_{c_v}) \right) \right) \end{aligned}$$

En forma de complejos tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} &= \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Kn}}}{P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{C_K}) + j \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Kn}}}{P_{G_n}} \text{sen}(90 - \theta_{C_K}) + \\ &+ \frac{V_{G_T}V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Vn}}}{P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{C_V}) + j \frac{V_{G_T}V_{G_n}^2}{\sqrt{3}V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n}}{100} \frac{P_{C_{Vn}}}{P_{G_n}} \text{sen}(90 - \theta_{C_V}) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{M_P}) + j \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}(90 - \theta_{M_P}) + \\
 & + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{kn}}}{100 P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{c_k}) + j \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{kn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}(90 - \theta_{c_k}) + \\
 & + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{vn}}}{100 P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{c_v}) + j \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{vn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}(90 - \theta_{c_v})
 \end{aligned}$$

Cómo  $\cos(90 - \theta) = \operatorname{sen}\theta$  e  $\operatorname{sen}(90 - \theta) = \cos\theta$

$$\begin{aligned}
 \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} &= \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Kn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{C_K} + j \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Kn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{C_K} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Vn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{C_V} \\
 & + j \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Vn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{C_V} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{M_P} + j \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{M_P} + \\
 & + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{kn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_k} + j \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{kn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{c_k} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{vn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_v} + \\
 & + j \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{vn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{c_v}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} &= \left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Kn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{C_K} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Vn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{C_V} + \right. \\
 & \left. + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{M_P} + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{kn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_k} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{vn}}}{100 P_{G_n}} \operatorname{sen}\theta_{c_v} \right] + \\
 & j \left[ \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Kn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{C_K} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Vn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{C_V} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{M_P} + \right. \\
 & \left. + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{kn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{c_k} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{vn}}}{100 P_{G_n}} \cos\theta_{c_v} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left| \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} \right|^2 &= \left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \operatorname{sen}\theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \operatorname{sen}\theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} \operatorname{sen}\theta_{M_P}}{100 V_{M_{Pn}} P_{G_n}} + \right. \\
 & \left. + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \operatorname{sen}\theta_{c_k}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{vn}} \operatorname{sen}\theta_{c_v}}{100 \sqrt{3} V_{C_{vn}}^2 P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \cos\theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \cos\theta_{c_k}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} \right. \\
 & \left. + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \cos\theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} \cos\theta_{M_P}}{100 V_{M_{Pn}} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{vn}} \cos\theta_{c_v}}{100 \sqrt{3} V_{C_{vn}}^2 P_{G_n}} \right]^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \operatorname{sen}\theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} V_{G_T} \operatorname{sen}\theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} V_{G_T} \operatorname{sen}\theta_{M_P}}{100 P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \right. \\
 & \left. + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \operatorname{sen}\theta_{c_k}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{vn}} V_{G_T} \operatorname{sen}\theta_{c_v}}{100 \sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2} \right]^2 + \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \cos\theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \right.
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} V_{G_T} \cos \theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} V_{G_T} \cos \theta_{M_P}}{100 P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \cos \theta_{C_k}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \left. \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{vn}} V_{G_T} \cos \theta_{C_v}}{100 \sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2} \right]^2 - \frac{V_G^2}{3} = 0$$

$$\left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} V_{G_T} \sin \theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} V_{G_T} \sin \theta_{M_P}}{100 P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{vn}} V_{G_T} \sin \theta_{C_v}}{100 \sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \sin \theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \sin \theta_{C_k}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} V_{G_T} \cos \theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} V_{G_T} \cos \theta_{M_P}}{100 P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{vn}} V_{G_T} \cos \theta_{C_v}}{100 \sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \cos \theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \cos \theta_{C_k}}{100 \sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} \right]^2 - \frac{V_G^2}{3} = 0$$

$$\left[ \left( \frac{1}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{C_{Vn}} \sin \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{I_{M_{Pn}} \sin \theta_{M_P}}{P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \frac{P_{C_{vn}} \sin \theta_{C_v}}{\sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100} \right) V_{G_T} + \left( \frac{P_{C_{Kn}} \sin \theta_{C_K}}{P_{G_n}} + \frac{P_{C_{kn}} \sin \theta_{C_k}}{P_{G_n}} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100 \sqrt{3} V_{G_T}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \cos \theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{I_{M_{Pn}} \cos \theta_{M_P}}{P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \frac{P_{C_{vn}} \cos \theta_{C_v}}{\sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2} \right) + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100} V_{G_T} + \left( \frac{P_{C_{Kn}} \cos \theta_{C_K}}{P_{G_n}} + \frac{P_{C_{kn}} \cos \theta_{C_k}}{P_{G_n}} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100 \sqrt{3} V_{G_T}} \right]^2 - \frac{V_G^2}{3} = 0$$

Si consideramos que:

$$x = V_{G_T}$$

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{C_{Vn}} \sin \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{I_{M_{Pn}} \sin \theta_{M_P}}{P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \frac{P_{C_{vn}} \sin \theta_{C_v}}{\sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100}$$

$$b_1 = \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \sin \theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \sin \theta_{C_k}}{100 \sqrt{3} P_{G_n}}$$

$$c_1 = \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \cos \theta_{C_V}}{100 \sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} \cos \theta_{M_P}}{100 P_{G_n} V_{M_{Pn}}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{vn}} \cos \theta_{C_v}}{100 \sqrt{3} P_{G_n} V_{C_{vn}}^2}$$

$$d_1 = \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \cos \theta_{C_K}}{100 \sqrt{3} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{kn}} \cos \theta_{C_k}}{100 \sqrt{3} P_{G_n}}$$

$$e_1 = -\frac{V_G^2}{3}$$

Podemos escribir la ecuación destacada como:

$$\left( a_1 x + \frac{b_1}{x} \right)^2 + \left( c_1 x + \frac{d_1}{x} \right)^2 + e_1 = 0$$

$$\left(a_1^2 x^2 + 2a_1 x \frac{b_1}{x} + \left(\frac{b_1}{x}\right)^2\right) + \left(c_1^2 x^2 + 2c_1 x \frac{d_1}{x} + \left(\frac{d_1}{x}\right)^2\right) + e_1 = 0$$

$$a_1^2 x^2 + 2a_1 b_1 + \frac{b_1^2}{x^2} + c_1^2 x^2 + 2c_1 d_1 + \frac{d_1^2}{x^2} + e_1 = 0$$

$$a_1^2 x^2 + c_1^2 x^2 + 2a_1 b_1 + 2c_1 d_1 + \frac{b_1^2 + d_1^2}{x^2} + e_1 = 0$$

$$(a_1^2 + c_1^2)x^2 + 2a_1 b_1 + 2c_1 d_1 + e_1 + \frac{b_1^2 + d_1^2}{x^2} = 0$$

Multiplicando por  $x^2$  tenemos:

$$(a_1^2 + c_1^2)x^4 + (2a_1 b_1 + 2c_1 d_1 + e_1)x^2 + b_1^2 + d_1^2 = 0$$

La solución de la ecuación anterior será la raíz real y positiva de la siguiente ecuación;

$$ax^4 + cx^2 + e = 0$$

Onde:

$$a = a_1^2 + c_1^2$$

$$c = 2a_1 b_1 + 2c_1 d_1 + e_1$$

$$e = b_1^2 + d_1^2$$

$$x^2 = V_{G_T}^2 = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}$$

$$V_{G_T} = \sqrt{\frac{-c + \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}}$$

La fórmula anterior proporciona el valor de la tensión en los terminales del alternador, no solo cuando se trata de carga permanente, constante y/o variable, sino también cuando está en una carga inicial y aplica una carga compuesta por otras cargas (constantes y/o variables) y arranque de motor(es), en conjunto o individualmente.

## 10 REACTANCIA TRANSITORIA DEL ALTERNADOR

Para calcular la reactancia transitoria del alternador, usaremos las fórmulas del cálculo de las tensiones en el alternador, sin y con carga inicial.

Del Cálculo de Tensión en el Alternador, apenas con carga inicial, tenemos:

$$\left| \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} \right|^2 = \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{c_{kn}}}{100\sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} \operatorname{sen} \theta_{c_k} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{c_{vn}}}{100\sqrt{3} V_{c_{vn}}^2 P_{G_n}} \operatorname{sen} \theta_{c_v} \right]^2 + \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{c_{kn}}}{100\sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} \cos \theta_{c_k} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{c_{vn}}}{100\sqrt{3} V_{c_{vn}}^2 P_{G_n}} \cos \theta_{c_v} \right]^2$$

Del cálculo de tensión en el Alternador, con carga inicial y aplicación de cargas, vimos que:

$$\left| \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} \right|^2 = \left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{sen} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{sen} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{P_n}} \text{sen} \theta_{M_P}}{100 V_{M_{P_n}} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{sen} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{sen} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{cos} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{cos} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{P_n}} \text{cos} \theta_{M_P}}{100 V_{M_{P_n}} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{cos} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{cos} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} \right]^2$$

Con el alternador teniendo una carga inicial, la tensión  $V_G$  del alternador no cambia instantáneamente al aplicar nueva(s) carga(s). Por lo tanto, como si el regulador de tensión no existiera, la tensión  $V_G$  del alternador, en el momento de la aplicación de la(s) nueva(s) carga(s), será la misma tensión que tenía el alternador cuando se alimentaba solo las cargas iniciales. La caída de tensión en los terminales del alternador será consecuencia de la variación de la corriente en la impedancia del alternador, debido a la aplicación de la(s) carga(s) nueva(s) carga(s) y variación de la corriente en las cargas iniciales. Después de la aplicación de la(s) nueva(s) carga(s), la tensión  $V_G$  del alternador será ajustada, por el regulador automático de tensión, de modo que la tensión en los terminales del alternador corresponda al valor de voltaje ajustado  $V_{G_A}$ .

Por lo tanto, igualando los valores de  $\left| \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} \right|^2$  de las dos ecuaciones resaltadas tenemos:

$$\left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{sen} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{C_{V_n}} \text{sen} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{cos} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_A} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} V_{G_A} P_{C_{V_n}} \text{cos} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} \right]^2 = \left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{sen} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{sen} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{P_n}} \text{sen} \theta_{M_P}}{100 V_{M_{P_n}} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{sen} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{sen} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{cos} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{cos} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{P_n}} \text{cos} \theta_{M_P}}{100 V_{M_{P_n}} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{K_n}} \text{cos} \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{V_n}} \text{cos} \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2 P_{G_n}} \right]^2$$

$$\left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{K_n}} \text{sen} \theta_{C_K}}{V_{G_A}} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_A} P_{C_{V_n}} \text{sen} \theta_{C_V}}{V_{C_{V_n}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 + \left[ \frac{P_{C_{K_n}} \text{cos} \theta_{C_K}}{V_{G_A}} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_A} P_{C_{V_n}} \text{cos} \theta_{C_V}}{V_{C_{V_n}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 = \left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{K_n}} \text{sen} \theta_{C_K}}{\sqrt{3} V_{G_T}} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_T} P_{C_{V_n}} \text{sen} \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{V_n}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[ \frac{V_{G_T} I_{M_{Pn}} \text{sen} \theta_{M_P}}{V_{M_{Pn}}} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{P_{C_{kn}} \text{sen} \theta_{C_k}}{\sqrt{3} V_{G_T}} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_T} P_{C_{vn}} \text{sen} \theta_{C_v}}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 \\
 & + \left[ \frac{P_{C_{Kn}} \text{cos} \theta_{C_K}}{\sqrt{3} V_{G_T}} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_T} P_{C_{Vn}} \text{cos} \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_T} I_{M_{Pn}} \text{cos} \theta_{M_P}}{V_{M_{Pn}}} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \right. \\
 & \left. + \frac{P_{C_{kn}} \text{cos} \theta_{C_k}}{\sqrt{3} V_{G_T}} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_T} P_{C_{vn}} \text{cos} \theta_{C_v}}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{C_{kn}} \text{sen} \theta_{C_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{C_{vn}} \text{sen} \theta_{C_v}}{V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 \sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{C_{kn}} \text{cos} \theta_{C_k}}{V_{G_A}} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{V_{G_A} P_{C_{vn}} \text{cos} \theta_{C_v}}{V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 \sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 = \left[ \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{C_{Kn}} \text{sen} \theta_{C_K}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \frac{V_{G_T} P_{C_{Vn}} \text{sen} \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{V_{G_T} I_{M_{Pn}} \text{sen} \theta_{M_P}}{V_{M_{Pn}}} + \frac{P_{C_{kn}} \text{sen} \theta_{C_k}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \frac{V_{G_T} P_{C_{vn}} \text{sen} \theta_{C_v}}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 + \\
 & + \left[ \left( \frac{P_{C_{Kn}} \text{cos} \theta_{C_K}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \frac{V_{G_T} P_{C_{Vn}} \text{cos} \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} + \frac{V_{G_T} I_{M_{Pn}} \text{cos} \theta_{M_P}}{V_{M_{Pn}}} + \frac{P_{C_{kn}} \text{cos} \theta_{C_k}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{V_{G_T} P_{C_{vn}} \text{cos} \theta_{C_v}}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2
 \end{aligned}$$

Si consideramos que:

$$x = X'_{G_n}$$

$$a_1 = \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}}$$

$$b_1 = \left( \frac{P_{C_{kn}} \text{sen} \theta_{C_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{C_{vn}} \text{sen} \theta_{C_v}}{V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 \sqrt{3} P_{G_n}}$$

$$c_1 = \left( \frac{P_{C_{kn}} \text{cos} \theta_{C_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{C_{vn}} \text{cos} \theta_{C_v}}{V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 \sqrt{3} P_{G_n}}$$

$$a_2 = \frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}$$

$$\begin{aligned}
 b_2 = & \left( \frac{P_{C_{Kn}} \text{sen} \theta_{C_K}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \frac{V_{G_T} P_{C_{Vn}} \text{sen} \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} + \frac{V_{G_T} I_{M_{Pn}} \text{sen} \theta_{M_P}}{V_{M_{Pn}}} + \frac{P_{C_{kn}} \text{sen} \theta_{C_k}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \right. \\
 & \left. + \frac{V_{G_T} P_{C_{vn}} \text{sen} \theta_{C_v}}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_2 = & \left( \frac{P_{C_{Kn}} \text{cos} \theta_{C_K}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \frac{V_{G_T} P_{C_{Vn}} \text{cos} \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} + \frac{V_{G_T} I_{M_{Pn}} \text{cos} \theta_{M_P}}{V_{M_{Pn}}} + \frac{P_{C_{kn}} \text{cos} \theta_{C_k}}{\sqrt{3} V_{G_T}} + \right. \\
 & \left. + \frac{V_{G_T} P_{C_{vn}} \text{cos} \theta_{C_v}}{\sqrt{3} V_{C_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}}
 \end{aligned}$$

Podemos escribir la ecuación destacada como:

$$(a_1 + b_1x)^2 + (c_1x)^2 = (a_2 + b_2x)^2 + (c_2x)^2$$

$$a_1^2 + 2a_1b_1x + b_1^2x^2 + c_1^2x^2 = a_2^2 + 2a_2b_2x + b_2^2x^2 + c_2^2x^2$$

$$b_2^2x^2 - b_1^2x^2 + c_2^2x^2 - c_1^2x^2 + 2a_2b_2x - 2a_1b_1x + a_2^2 - a_1^2 = 0$$

$$(b_2^2 - b_1^2 + c_2^2 - c_1^2)x^2 + (2a_2b_2 - 2a_1b_1)x + (a_2^2 - a_1^2) = 0$$

La solución de la ecuación anterior será la raíz real y positiva de la siguiente ecuación;

$$ax^2 + cx + e = 0$$

Onde:

$$a = b_2^2 - b_1^2 + c_2^2 - c_1^2$$

$$c = 2a_2b_2 - 2a_1b_1$$

$$e = a_2^2 - a_1^2$$

$$x = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}$$

$$X'_{G_n} = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}$$

Donde  $X'_{G_n}$  es el valor máximo calculado para la reactancia transitoria del alternador, que cumple los requisitos definidos por el usuario.

## 11 PREPARACIÓN DE LAS PLANILLAS EXCEL

Las planillas Excel se elaboraron en base a los conceptos desarrollados en este informativo. La parte teórica no es indispensable para su uso, pero es importante para comprender el problema y el posible desarrollo de estudios posteriores.

Se elaboraron dos planillas para determinar la reactancia transitoria del alternador, e dos para calcular la tensión en los terminales del alternador, una completa y otra simplificada, ambas en un mismo archivo. En las planillas completas se indican las fórmulas y términos utilizados en el cálculo y, en las simplificadas, que son idénticas a las completas, solo las informaciones básicas son visibles.

Dado que las dos planillas son idénticas, los campos y las informaciones de la planilla completa, que no son visibles en la planilla simplificada, están ocultos, pero siguen activos. Por lo tanto, cualquier cambio, o introducción de informaciones, debe hacerse con cuidado de no corromper el archivo.

Las planillas se pueden utilizar para sistemas de 50 o 60Hz, con las debidas adecuaciones, y para cualquier valor de tensión del sistema y de las cargas.

Debido a que en una instalación puede haber cargas con tensiones nominales diferentes a las del sistema, existen campos para llenar con esta información. Por ejemplo, puede haber motores y cargas con tensiones nominales de 220V, 380V, 440V, 460V, 480, etc.

Los campos con factores de potencia de cargas también se dejaron para ser completados con los datos reales.

Las planillas son para todos los casos, es decir, el alternador puede o no estar con carga inicial, esta carga inicial puede estar formada por carga constante o variable. La carga por

aplicar, estando el alternador con carga inicial, puede ser de uno o más tipos de cargas, constantes, variables o motor(es).

La referencia hecha a motor(es) es para permitir la consideración de un solo motor o conjunto de motores, cuyos datos deben ser definidos por el usuario. Por ejemplo, si se desea determinar el valor máximo de la reactancia transitoria y la tensión en los terminales del alternador, con el arranque simultáneo de dos motores con características diferentes, los valores equivalentes de la corriente de arranque y el factor de potencia correspondiente a los dos motores deben informarse en las planillas.

Para evitar errores e inconsistencias en los resultados, la cumplimentación de los campos de las hojas de trabajo debe realizarse correctamente y, los datos informados, deben ser coherentes con las limitaciones de equipos y cargas.

### 11.1 Planillas de Cálculo de la Reactancia Transitoria

Las planillas de cálculo de la reactancia transitoria del alternador están diseñadas para definir el valor máximo de reactancia transitoria, lo que garantiza que la tensión en los terminales del alternador sea igual o superior al valor definido por el usuario, teniendo en cuenta que el grupo está funcionando sin carga o con cargas iniciales y, durante el funcionamiento normal, se apliquen, individualmente o en conjunto, cargas de potencia constante, variable o arranque de motor(es).

Como los valores de las reactancias transitorias generalmente no corresponden a las potencias nominales de los alternadores que se encuentran en el mercado, el usuario debe elegir la combinación de potencia nominal y reactancia transitoria, que satisfaga sus necesidades.

### 11.2 Planillas de Cálculo de la Tensión en los Terminales

Se elaboraron las planillas de cálculo de la tensión en los terminales del alternador para, en base a los datos del alternador y cargas, determinar la tensión en sus terminales para desarrollar los estudios del comportamiento de los sistemas y calcular los demás componentes de la instalación.

Se debe prestar especial atención al valor de la tensión de operación ajustada, ya que este valor puede ser superior a la tensión nominal del alternador y del sistema. En el caso de grupos de emergencia, este valor puede estar cerca del valor máximo soportable por los componentes de la instalación. Se deben respetar los límites de los ajustes de tensión y potencia de carga para que no excedan los límites establecidos por el equipo y las cargas.

La potencia continua total aplicada al alternador no excederá la potencia admisible definida por el fabricante del grupo electrógeno. La potencia continua total aplicada puede ser incluso mayor que la potencia nominal del alternador, pero su valor y tiempo de duración deben ser establecidos y administrados por el usuario.

**Importante:** Teóricamente, cuando el grupo está operando a carga permanente, la tensión en los terminales del alternador se mantendrá constante por el regulador automático de tensión, al valor ajustado por el usuario, para cualquier valor de carga que esté dentro de las capacidades del grupo.

A efectos del cálculo de la tensión en los terminales del alternador, el valor máximo de tensión  $V_G$  del alternador se limitó en función de la tensión máxima de ajuste de operación  $V_{GA}$ , con el alternador funcionando con potencia y factor de potencia nominales. Normalmente, el valor máximo de la tensión ajustada  $V_{GA}$  es el 110% de la tensión nominal.

Por lo tanto, para estos casos, la tensión máxima  $V_G$  del alternador debe considerar que la potencia proporcionada por el grupo es la potencia nominal del alternador, con un factor de potencia igual a 0,8.

## 12 EJEMPLO COMENTADO DE APLICACIÓN

Las planillas de cálculo permiten al usuario simular, rápidamente, muchas alternativas. Sin embargo, en este informativo se realizarán solo algunas de estas simulaciones.

### 12.1 Ejemplo

Considerando que en una instalación se desea calcular la reactancia transitoria y las tensiones en los terminales de un alternador, cuya potencia nominal requerida se estableció en 1000kVA y que:

- 1 – La tensión nominal del sistema: 480V
- 2 - Tensión nominal del alternador: 480V.
- 3 - Tensión mínima permitida en los terminales del alternador: 95% de la tensión nominal, es decir, 456V.
- 4 – La tensión de operación del alternador se ajustará al 105% de la tensión nominal, es decir, 504V.
- 5 - La carga inicial del grupo, compuesta por cargas de potencia constante, asciende a 350kVA, con tensión nominal de 460V y factor de potencia 0,85.
- 6 - La carga inicial del grupo, compuesta por cargas de potencia variable, asciende a 250kVA, con tensión nominal de 480V y factor de potencia 0,9.
- 7 - Cuando el grupo funcione con la carga inicial, se conectará la fuente de alimentación de un tablero con las siguientes cargas, que se aplicarán juntas:
  - Carga de potencia constante de 50kVA, 460V y factor de potencia 0.85.
  - Carga de potencia variable de 100kVA, 480V y factor de potencia 0.9.
  - Un motor de inducción de 75hp, 460V, corriente de arranque 710A con factor de potencia de 0.30.
  - Un motor de inducción de 30hp, 460V, corriente de arranque de 320A con factor de potencia de 0.35.

### 12.2 Elección del Alternador

Debido a que la potencia nominal del alternador se definió en base a un estudio, que no es el alcance de este informativo, el primer paso es determinar la reactancia transitoria del alternador en función de los datos proporcionados.

Para poder llenar la planilla de cálculo de la reactancia transitoria es necesario calcular la corriente de arranque y el factor de potencia equivalente de los motores de 75hp y 30hp, que se muestra en la siguiente tabla:

Motor	Tensión Nominal	Corriente de Arranque	Factor de Potencia
75hp	460	710	0,3
30hp	460	320	0,35
Equivalente	460	1030	0,32

Llenando la planilla de cálculo con los datos tenemos:

DATOS DEL SISTEMA				
Alternador	$VG_n$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480	
	$VG_A$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	504	
	$PG_n$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1000	
	$VG_T$	Tensión em los Terminales del Alternador (V)	456	
Datos de las Cargas	Inicial	$PC_{kn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	350
		$VC_{kn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	460
		$FPC_k$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,85
		$PC_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Variable (kVA)	250
		$VC_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Variable (V)	480
		$FPC_v$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Variable	0,9
	Carga a ser Aplicada	$PC_{Kn}$	Potencia Nominal de la Carga Constante (kVA)	50
		$VC_{Kn}$	Tensión Nominal de la Carga Constante (V)	460
		$FPC_K$	Factor de Potencia de la Carga Constante	0,85
		$PC_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Variable (kVA)	100
		$VC_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Variable (V)	480
		$FPC_v$	Factor de Potencia de la Carga Variable	0,9
		$VM_{Pn}$	Tensión Nominal del de(los) Motor(es) (V)	460
		$IM_{Pn}$	Corriente de Arranque de Motor(es) a Tensión Nominal (A)	1030
		$FPM_p$	Factor de Potencia del de(los) Motor(es) en el Arranque	0,32

Reactancia transitória del alternador	$X'G_n$ (%)	10,98
---------------------------------------	-------------	-------

Es decir, el alternador de 1000kVA que satisfaga la necesidad debe tener una reactancia transitoria nominal máxima del 10,98%. De los datos de los alternadores WEG, línea AG10, tenemos los siguientes datos:

Modelo	480 V - Y / 240 V - YY					
	$\Delta T$	80 °C	105 °C	125 °C	150 °C	163 °C
280MI30AI	kVA	456	510	570	600	650
	kW	365	408	456	480	520
280MI40AI	kVA	484	565	605	650	691
	kW	387	452	484	520	553
315MI10AI	kVA	520	596	650	700	750
	kW	416	477	520	560	600
315MI15AI	kVA	570	650	710	780	825
	kW	456	520	568	624	660
315MI20AI	kVA	642	736	803	875	906
	kW	514	589	642	700	725
315MI30AI	kVA	740	850	925	1010	1056
	kW	592	680	740	808	845
315MI40AI	kVA	832	953	1040	1100	1160
	kW	666	763	832	880	928
355MI70AI	kVA	1120	1283	1400	1450	1520
	kW	896	1026	1120	1160	1216
355MI80AI	kVA	1280	1466	1600	1660	1720
	kW	1024	1173	1280	1328	1376
355MI90AI	kVA	1440	1650	1800	1950	2000
	kW	1152	1320	1440	1560	1600

Modelo	$X_d'$ (%) Saturada
	220/440 V
250SI10AI	17,43
250SI20AI	18,39
250MI00AI	18,40
250MI10AI	16,58
250MI20AI	16,40
280MI20AI	16,53
280MI30AI	19,70
280MI40AI	13,80
315MI10AI	20,40
315MI15AI	19,25
315MI20AI	19,50
315MI30AI	17,18
315MI40AI	17,70
355MI70AI	16,50
355MI80AI	20,00
355MI90AI	24,20

Según la potencia nominal, podemos elegir el alternador 1040kVA Modelo 315MI40AI. La reactancia transitoria nominal, a 440V, es del 17,18%, que referido a la tensión de 480V y potencia 1000kVA es:

$$Z_{G(480)} = Z_{G(440)} \frac{440^2 \cdot 1000}{480^2 \cdot 1040}$$

$$Z_{G(480)} = 17,7 \frac{440^2 \cdot 1000}{480^2 \cdot 1040} = 14,30\%$$

Este alternador no cumple con el valor calculado de 10.98%.

Pasando al alternador 1400kVA Modelo 355MI70AI, cuya reactancia transitoria nominal a 440V es del 16,5%, que referida a la tensión de 480V y potencia 1000kVA es:

$$Z_{G(480)} = 16,5 \frac{440^2 \cdot 1000}{480^2 \cdot 1400} = 9,90\%$$

El alternador cumple con los requisitos requeridos.

### 12.3 Tensiones en los Terminales del Alternador

La tensión nominal del Alternador Modelo 355MI70AI será de 480 y la reactancia nominal referida a la tensión de 480V y la potencia de 1400kVA será:

$$Z_{G(480)} = 16,5 \frac{440^2}{480^2} = 13,865\%$$

La tensión en los terminales del alternador 1400kVA Modelo 355MI70AI, en las condiciones definidas en el ejemplo será de 460,48V, es decir, superior al valor mínimo requerido de 456V.

DATOS DEL SISTEMA				
Alternador	$VG_n$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480	
	$VG_A$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	504	
	$PG_n$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1400	
	$Z'G_n$	Reactancia Transitoria Nominal del Alternador (%)	13,865	
Datos de las Cargas	Inicial	$PC_{kn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	350
		$VC_{kn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	460
		$FPC_k$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,85
		$PC_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Variable (kVA)	250
		$VC_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Variable (V)	480
		$FPC_v$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Variable	0,9
	Carga a ser Aplicada	$PC_{Kn}$	Potencia Nominal de la Carga Constante (kVA)	50
		$VC_{Kn}$	Tensión Nominal de la Carga Constante (V)	460
		$FPC_K$	Factor de Potencia de la Carga Constante	0,85
		$PC_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Variable (kVA)	100
		$VC_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Variable (V)	480
		$FPC_V$	Factor de Potencia de la Carga Variable	0,9
		$VM_{Pn}$	Tensión Nominal del de(los) Motor(es) (V)	460
		$IM_{Pn}$	Corriente de Arranque de Motor(es) a Tensión Nominal (A)	1030
$FPM_P$	Factor de Potencia del de(los) Motor(es) en el Arranque	0,32		

Tensión en los Terminales del Alternador (V)	$V_{GT} (\%)$	460,48
--	---------------	--------

### 12.4 Comentarios

Como se puede observar, el uso de las planillas de cálculo permite realizar muchas simulaciones y analizar alternativas que se pueden adoptar, comprobando el comportamiento de las tensiones para diversas situaciones de carga.

Como difícilmente se encontrará un alternador con la potencia nominal definida y la reactancia transitoria nominal calculada con la ayuda de la planilla de cálculo, la mejor solución es, consultando los datos de los alternadores del mercado, elegir el que más se aproxime a las características necesarias, como se hizo en el ejemplo.

La elección del alternador de potencia nominal de 1400kVA no implica que el grupo electrógeno diésel deba tener esta capacidad. Por lo tanto, el grupo puede tener una potencia nominal de 1000kVA con alternador de 1400kVA.

A través de simulaciones, se pueden explorar otras situaciones que pueden satisfacer las necesidades de la instalación, sin ser exactamente las definidas inicialmente. Por ejemplo, puede reducir el valor de la tensión mínima permitida en los terminales del alternador, aumentar el valor de la tensión de operación ajustado o incluso combinando las dos opciones.

Una alternativa que se analizará es cambiar en las condiciones de operación. Por ejemplo, retrasar el arranque del motor de 75hp durante unos segundos, es decir, en una primera fase aplica la carga considerada, excepto el motor de 75hp, que se aplicaría en la segunda fase.

Considerando el alternador 1040kVA Modelo 315MI40AI, la reactancia transitoria de 17.7% a 440V referida a la tensión de 480V será:

$$Z_{G(480)} = 17,7 \frac{440^2}{480^2} = 14,873\%$$

DATOS DEL SISTEMA				
Alternador	$VG_n$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480	
	$VG_A$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	504	
	$PG_n$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1040	
	$Z'G_n$	Reactancia Transitoria Nominal del Alternador (%)	14,873	
Datos de las Cargas	Inicial	$Pc_{kn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	350
		$Vc_{kn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	460
		$FPC_k$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,85
		$Pc_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Variable (kVA)	250
		$Vc_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Variable (V)	480
		$FPC_v$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Variable	0,9
	Carga a ser Aplicada	$PC_{Kn}$	Potencia Nominal de la Carga Constante (kVA)	50
		$VC_{Kn}$	Tensión Nominal de la Carga Constante (V)	460
		$FPC_K$	Factor de Potencia de la Carga Constante	0,85
		$PC_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Variable (kVA)	100
		$VC_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Variable (V)	480
		$FPC_V$	Factor de Potencia de la Carga Variable	0,9
		$VM_{pn}$	Tensión Nominal del de(los) Motor(es) (V)	460
		$IM_{pn}$	Corriente de Arranque de Motor(es) a Tensión Nominal (A)	320
$FPM_p$	Factor de Potencia del de(los) Motor(es) en el Arranque	0,35		

Tensión em los Terminales del Alternador (V)	$V_{GT} (\%)$	479,79
--	---------------	--------

Por lo tanto, la tensión en los terminales del alternador sería de 479.79V en la primera fase.

DATOS DEL SISTEMA				
Alternador	$VG_n$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480	
	$VG_A$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	504	
	$PG_n$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1040	
	$Z'G_n$	Reactancia Transitoria Nominal del Alternador (%)	14,873	
Datos de las Cargas	Inicial	$PC_{kn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	430
		$VC_{kn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	460
		$FPC_k$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,85
		$PC_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Variable (kVA)	350
		$VC_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Variable (V)	480
		$FPC_v$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Variable	0,9
	Carga a ser Aplicada	$PC_{Kn}$	Potencia Nominal de la Carga Constante (kVA)	
		$VC_{Kn}$	Tensión Nominal de la Carga Constante (V)	
		$FPC_K$	Factor de Potencia de la Carga Constante	
		$PC_{vn}$	Potencia Nominal de la Carga Variable (kVA)	
		$VC_{vn}$	Tensión Nominal de la Carga Variable (V)	
		$FPC_V$	Factor de Potencia de la Carga Variable	
		$VM_{Pn}$	Tensión Nominal del de(los) Motor(es) (V)	460
		$IM_{Pn}$	Corriente de Arranque de Motor(es) a Tensión Nominal (A)	710
$FPM_p$	Factor de Potencia del de(los) Motor(es) en el Arranque	0,3		

Tensión en los Terminales del Alternador (V)	$V_{GT}$ (%)	463,40
--	--------------	--------

En la segunda fase solo arranca el motor de 75 hp, con una diferencia de unos segundos después de la primera (tiempo de estabilización de tensión en los terminales del alternador), Durante el arranque del motor de 75 hp, la tensión en los terminales del alternador será de 463.40V. En esta fase, considerando que motores son carga de potencia constante, y que 1hp = 1kVA, la carga del motor de 30hp se incluye en la carga inicial de potencia constante.

### 12.5 Comentarios adicionales

En estos comentarios se abordarán los problemas de sobrecargas con la limitación de tensión  $V_G$  del alternador, que cambian la tensión  $V_{G_A}$  de operación ajustada, y compatibilidad de los valores de las cargas.

#### 12.5.1 Limitación de Tensión $V_G$ del Alternador

Como, teóricamente, el regulador de tensión debe mantener constante la tensión en los terminales del alternador, para cualquier valor de carga aplicada y siempre que el motor diésel tenga capacidad para esto, el valor de tensión  $V_G$  debería ser ilimitado. Sin embargo, como esto no ocurre, en las planillas de cálculo de este informativo se estableció que el valor máximo de la tensión  $V_G$  será la tensión calculada cuando el alternador alimenta una carga de potencia constante igual a la potencia nominal del alternador, con factor de potencia 0.8 (estándar normal de los fabricantes), tensión nominal de la carga igual a las tensiones nominales del alternador y sistema, para tensión de operación  $V_{G_A}$  ajustada.

Para el alternador Modelo 355MI70AI, 1400kVA, 480V, reactancia transitoria nominal 13.865%, tensión  $V_{G_A}$  de operación ajustada en 504V, la tensión en los terminales del

alternador será 504V, como ajustada, y la tensión  $V_G$  máxima del alternador, para el valor  $V_{G_A}$  ajustado será 544.40V, que se puede ver en la información de la planilla completa.

DATOS DEL SISTEMA			
Alternador	$V_{G_n}$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480
	$V_{G_A}$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	504
	$P_{G_n}$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1400
	$Z'G_n$	Reactancia Transitoria Nominal del Alternador (%)	13,865
Carga Inicial	$P_{c_{kn}}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	1400
	$V_{c_{kn}}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	480
	$FPC_k$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,8
Tensión en los Terminales del Alternador (V)		$V_{GT} (\%)$	504,00

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$V_G(V)$  544,40

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$V_G(V)$  544,40

$V_G(V)$  544,40

$V_G$  - Tension en el Alternador (V)

Si el valor de tensión ajustado es, por ejemplo, 528V (480V + 10%), la tensión en los terminales del alternador será de 528V y la tensión  $V_G$  máxima del alternador será 566.37V.

DATOS DEL SISTEMA			
Alternador	$V_{G_n}$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480
	$V_{G_A}$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	528
	$P_{G_n}$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1400
	$Z'G_n$	Reactancia Transitoria Nominal del Alternador (%)	13,865
Carga Inicial	$P_{c_{kn}}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	1400
	$V_{c_{kn}}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	480
	$FPC_k$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,8
Tensión en los Terminales del Alternador (V)		$V_{GT} (\%)$	528,00

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$V_G(V)$  566,37

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$V_G(V)$  566,37

$V_G(V)$  566,37

$V_G$  - Tension en el Alternador (V)

Con la limitación de la tensión máxima de  $V_G$ , si la carga es superior a la potencia nominal del alternador, el valor de la tensión en los terminales del alternador será menor que el valor ajustado de operación  $V_{G_A}$ , debido al límite impuesto.

Considerando que la carga del alternador, en vez de 1400kVA es de 1800kVA, para el valor  $V_{G_A}$  de tensión de operación establecido en 504V, la tensión en los terminales será de 489,95V en lugar de 504V.

DATOS DEL SISTEMA			
Alternador	$V_{G_n}$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480
	$V_{G_A}$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	504
	$P_{G_n}$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1400
	$Z'_{G_n}$	Reactancia Transitoria Nominal del Alternador (%)	13,865
Carga Inicial	$P_{c_{kn}}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	1800
	$V_{c_{kn}}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	480
	$F_{Pc_k}$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,8
Tensión en los Terminales del Alternador (V)		$V_{GT} (%)$	489,95

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$V_G(V)$  556,73

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$V_G(V)$  544,40

$V_G(V)$  544,40

$V_G$  - Tensión en el Alternador (V)

Observar en la planilla completa que la tensión  $V_G$  del alternador se limitó a 544,40V, para la tensión  $V_{G_A}$  ajustada en 504V, pero para mantener la tensión en el valor ajustado, la tensión  $V_G$  del alternador debería ser 556,73V.

DATOS DEL SISTEMA			
Alternador	$V_{G_n}$	Tensión Nominal del Alternador (V)	480
	$V_{G_A}$	Tensión de Operación Ajustada en el Alternador (V)	528
	$P_{G_n}$	Potencia Nominal del Alternador (kVA)	1400
	$Z'_{G_n}$	Reactancia Transitoria Nominal del Alternador (%)	13,865
Carga Inicial	$P_{c_{kn}}$	Potencia Nominal de la Carga Inicial Constante (kVA)	1800
	$V_{c_{kn}}$	Tensión Nominal de la Carga Inicial Constante (V)	480
	$F_{Pc_k}$	Factor de Potencia de la Carga Inicial Constante	0,8
Tensión en los Terminales del Alternador (V)		$V_{GT} (%)$	514,91

Para el valor de tensión de operación  $V_{G_A}$  ajustado en 528V, la tensión en los terminales del alternador será 514,91V en lugar de 528V.

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)** 578,03

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)** 566,37

**V<sub>G</sub>(V)** 566,37

*V<sub>G</sub>- Tension en el Alternador (V)*

Del mismo modo, la tensión del alternador  $V_G$  se limitó a 566,37V para la tensión ajustada  $V_{G_A}$  en 528V, pero para mantener la tensión en el valor ajustado, la tensión  $V_G$  del alternador debería ser 578,03V.

Si desea dejar de limitar el valor máximo de tensión  $V_G$  del alternador, se debe imponer otro límite. Por ejemplo, considerando el ejemplo citado, donde la carga del alternador en lugar de 1400kVA es de 1800kVA, para el valor de tensión de operación  $V_{G_A}$  ajustado en 528V, la tensión en los terminales será 514,91V, en lugar de 528V, porque la tensión  $V_G$  estaba limitada a 566,37V.

Si imponemos el valor de 578,03V a  $V_G$ , veremos que la tensión en los terminales se mantendrán en el valor de la tensión de operación  $V_{G_A}$  ajustado. El valor que imponer debe introducirse en la planilla completa, en el campo indicado en la figura siguiente:

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)** #DIV/0!

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)** 578,03

**V<sub>G</sub>(V)** #DIV/0!

*V<sub>G</sub>- Tension en el Alternador (V)*

Por lo tanto, para cargas de, por ejemplo, 800kVA, 1400kVA y 1800kVA, la tensión en los terminales del alternador se mantendrá en el valor ajustado, con las siguientes informaciones de la planilla completa:

Para 800kVA:

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)** 549,44

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)** 578,03

**V<sub>G</sub>(V)** 549,44

*V<sub>G</sub>- Tension en el Alternador (V)*

Para 1400kVA:

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vm}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vm}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vm}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vm}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)**      566,37

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)**      578,03

**V<sub>G</sub>(V)**      566,37

*V<sub>G</sub> - Tension en el Alternador (V)*

Para 1800kVA:

$$V_G = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{sen } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vm}} \text{sen } \theta_{c_v}}{V_{c_{vm}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{P_{c_{kn}} \text{cos } \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vm}} \text{cos } \theta_{c_v}}{V_{c_{vm}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)**      578,03

$$V_{G_{MAX}} = \sqrt{3} \left( \left[ \frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{0,6 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right]^2 + \left( \frac{0,8 V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} V_{G_A}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**V<sub>G</sub>(V)**      578,03

**V<sub>G</sub>(V)**      578,03

*V<sub>G</sub> - Tension en el Alternador (V)*

### 12.5.2 Compatibilidad de Informaciones y Valores

Las informaciones de valores a llenar en las planillas deben ser observadas para que los cálculos sean más precisos. Estas informaciones son:

a) Para alternadores:

Potencias nominales, tensiones nominales, tensiones de operación ajustadas, rangos de ajuste de tensiones de funcionamiento, valores de sobrecarga y su duración, reactancias transitorias y referencia de valores. La aplicación de cuidados con estas informaciones fue explorada en el ejemplo considerado en este informativo.

b) Para cargas de potencia constante:

Potencias nominales, tensiones nominales, factor de potencia. En la aplicación de estas cargas, con el alternador con o sin carga inicial, estos valores deben ser informados porque se utilizan en los cálculos. Sin embargo, cuando se consideran como carga inicial, hay una diferencia entre el valor de las cargas individuales y el valor equivalente. Por ejemplo, considerando un alternador:

- Sin carga y la aplicación de una carga constante de, por ejemplo, 100kVA, tensión nominal 460V, factor de potencia 0,9.

- Con la carga inicial constante de 100kVA factor de potencia 0.9 y la aplicación de una carga constante de 200kVA, voltaje nominal 480V, factor de potencia 0.8.

Después de la aplicación de la segunda carga constante de 200kVA, con el alternador con la carga inicial, la carga final será una carga constante equivalente de:

Cargas de Potencia Constante				
Carga (KVA)	Tensión Nominal	Factor de Potencia	kW	kVAR
100	480	0,9	90	44
200	440	0,8	160	120
300	(1)	0,84	250	164

(1) Para todos los efectos, como la carga es de potencia constante, el valor de la tensión nominal da la carga nominal no es relevante. Por lo tanto, puede ser 480V o 460V.

La carga total será la suma de las dos potencias nominales.

c) Para cargas de potencia variable:

Potencias nominales, tensiones nominales, factor de potencia. En la aplicación de estas cargas, con el alternador con o sin carga inicial, estos valores deben ser informados porque se utilizan en los cálculos. Sin embargo, cuando se considera como carga inicial, también hay una diferencia entre el valor de las cargas individuales y el valor equivalente. Por ejemplo, considerando un alternador:

- Sin carga y la aplicación de una carga variable de, por ejemplo, 100kVA, tensión nominal 480V, factor de potencia 0,9.

- Con la carga inicial variable de 100kVA factor de potencia 0,9 y la aplicación de una carga variable de 200kVA, tensión nominal 440V, factor de potencia 0,8.

Después de aplicar la segunda carga variable, estando el alternador con la carga inicial, la carga final será una carga variable de:

Cargas de Potencia Variable				
Carga (KVA)	Tensión Nominal	Factor de Potencia	kW	kVAR
100	480	0,9	90	44
200	440	0,8	190	143
337	(1)	0,83	280	186

(1) Como la carga es de potencia variable, el valor de la tensión nominal de las cargas debe ser el mismo, porque la potencia varía con el cuadrado de la variación de tensión. Preferiblemente adoptar el valor de tensión nominal de la carga inicial en caso de 480V.

d) Para motores:

Los cuidados en la aplicación de estas informaciones fueron explorados en el ejemplo considerado en este informativo.

e) Observaciones

La aplicación de los cuidados con la compatibilidad de unidades y valores de cargas es una práctica para obtener una mayor precisión en el resultado. Por lo tanto, este cuidado no necesita ser tan riguroso para los cálculos aproximados.

Las correcciones de valores no son necesarias para la aplicación de cargas, potencia constante y/o variable, cuando el alternador está a carga inicial.