

GRUPOS DIESEL GERADORES
**Cálculo da Reatância Transitória e da
Tensão nos Terminais**

ÍNDICE	PÁG.
1 OBJETIVO.....	4
2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA.....	4
2.1 Planilhas	4
3 CIRCUITOS BÁSICOS.....	4
4 ALTERNADORES	5
4.1 Características	6
4.2 Tensões	6
4.3 Impedância do Alternador.....	6
4.4 Resistência do Alternador	6
4.5 Reatância Transitória do Alternador	6
4.6 Ângulo da Impedância.....	6
4.7 Impedância e Ângulo.....	7
5 CARGAS DE POTÊNCIA CONSTANTE.....	7
5.1 Potência da Carga Constante	8
5.2 Impedância da Carga Constante	8
5.3 Ângulo da Impedância Carga Constante	8
5.4 Corrente da Carga Constante	8
6 CARGAS DE POTÊNCIA VARIÁVEL.....	9
6.1 Potência de Carga Variável.....	9
6.2 Impedância da Carga Variável	9
6.3 Ângulo da Impedância da Carga Variável.....	10
6.4 Corrente da Carga Variável.....	10
7 PARTIDA DE MOTORES.....	10
7.1 Potência de Partida de Motores.....	10
7.2 Impedância do(s) Motor(es) na Partida.....	11
7.3 Ângulo da Impedância do(s) Motor(es) na Partida	11
7.4 Corrente na Partida do(s) Motor(es).....	11
8 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO ANALISADAS	12
9 TENSÃO NO ALTERNADOR	12
9.1 Tensão no Alternador (VG) com Carga Inicial	13
9.2 Limite a Tensão VG do Alternador	15
9.3 Tensão nos Terminais do Alternador na Aplicação de Carga(s)	16
10 REATÂNCIA TRANSITÓRIA DO ALTERNADOR.....	20
11 ELABORAÇÃO DAS PLANILHAS EXCEL	23
11.1 Planilhas do Cálculo da Reatância Transitória	24

ÍNDICE	PÁG.
11.2 Planilhas do Cálculo da Tensão nos Terminais.....	24
12 EXEMPLO COMENTADO DE APLICAÇÃO.....	25
12.1 Exemplo.....	25
12.2 Escolha do Alternador.....	25
12.3 Tensões nos Terminais do Alternador.....	27
12.4 Comentários.....	28
12.5 Comentários Adicionais.....	29
12.5.1 Limitação de Tensão VG do Alternador.....	29
12.5.2 Compatibilidade de Informações e Valores	33

1 OBJETIVO

O objetivo deste informativo é analisar as condições de operação de alternadores de grupos diesel geradores, para calcular a reatância transitória que atenda às necessidades do sistema, e calcular a tensão nos terminais do alternador durante os períodos transitórios. Com base nessa análise serão elaboradas as planilhas Excel para efetuar os cálculos.

2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

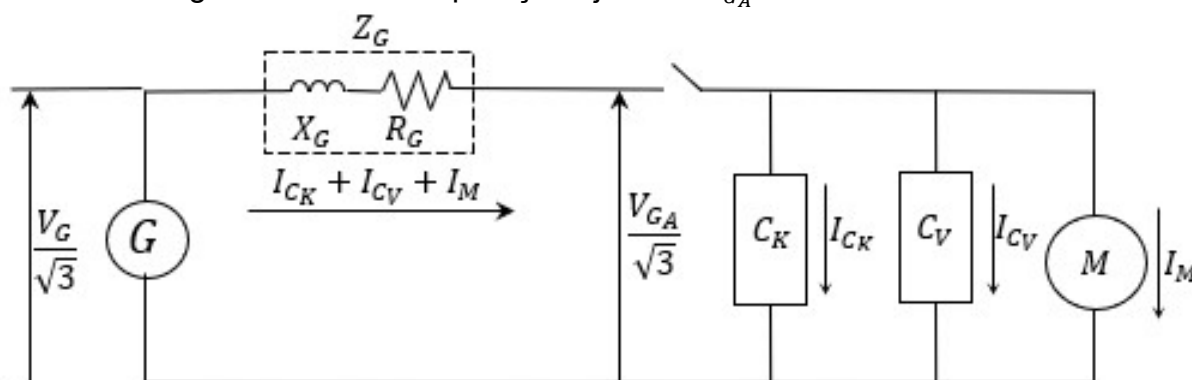
2.1 Planilhas

PL.EL.SA.CA.02.R1 Grupos Diesel Geradores Cálculo da Reatância Transitória

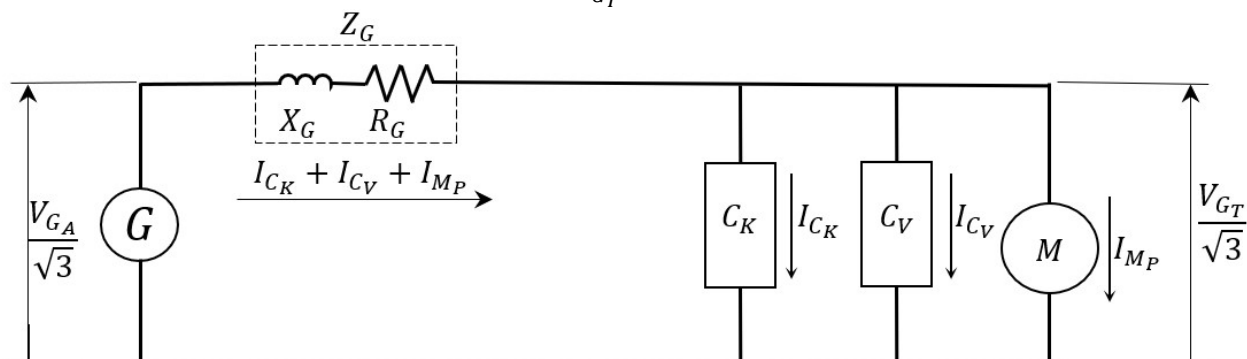
PL.EL.SA.CA.03.R1 Grupos Diesel Geradores Cálculo da Tensão nos Terminais

3 CIRCUITOS BÁSICOS

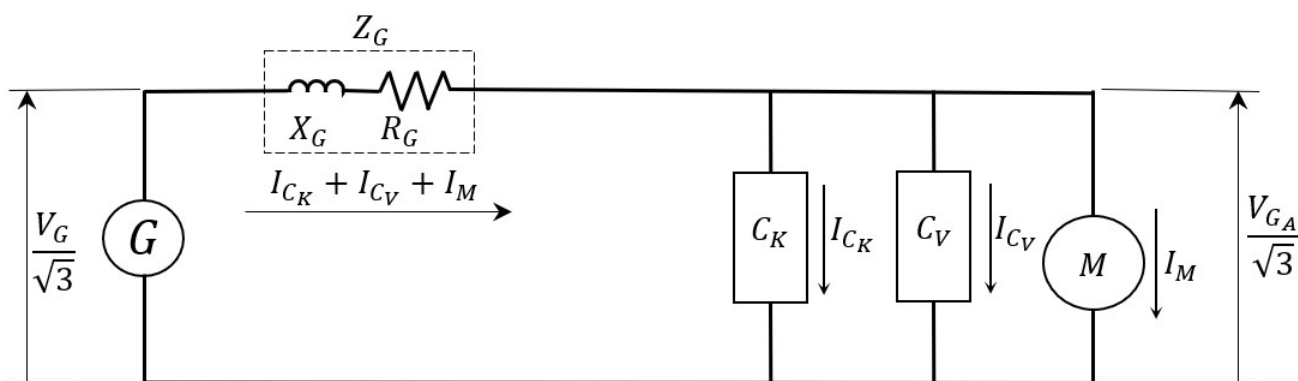
A figura abaixo representa o circuito de um alternador em vazio e os diversos tipos de cargas que são normalmente encontrados na prática. As cargas podem ser de potência constante C_K , potência variável C_V e motores de indução M . As cargas podem ser aplicadas em conjunto ou individualmente. Observar que, nesta condição, como o gerador está em vazio $I_{C_K} + I_{C_V} + I_{M_P} = 0$, não há queda de tensão no alternador. Portanto, a tensão V_G no alternador é igual a tensão de operação ajustada V_{G_A} nos terminais do alternador.



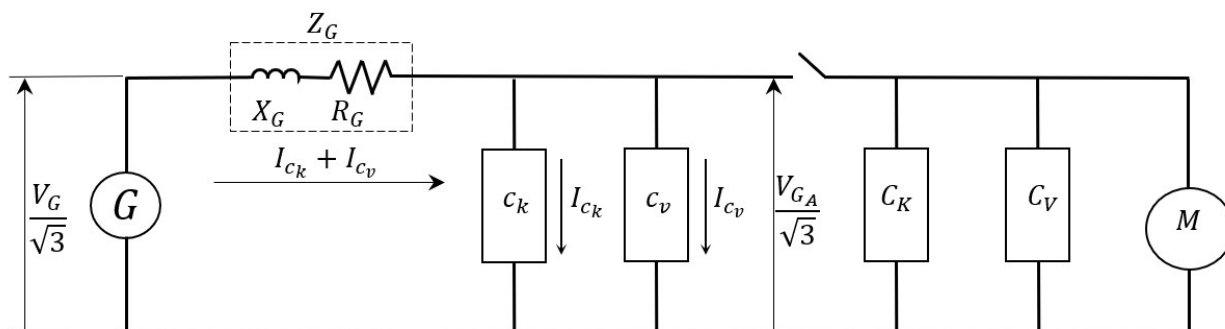
A figura a seguir representa o circuito no instante da aplicação da(s) carga(s), quando a tensão no alternador V_G é igual a tensão de operação ajustada V_{G_A} e, a tensão nas cargas é a tensão nos terminais do alternador é V_{G_T} .



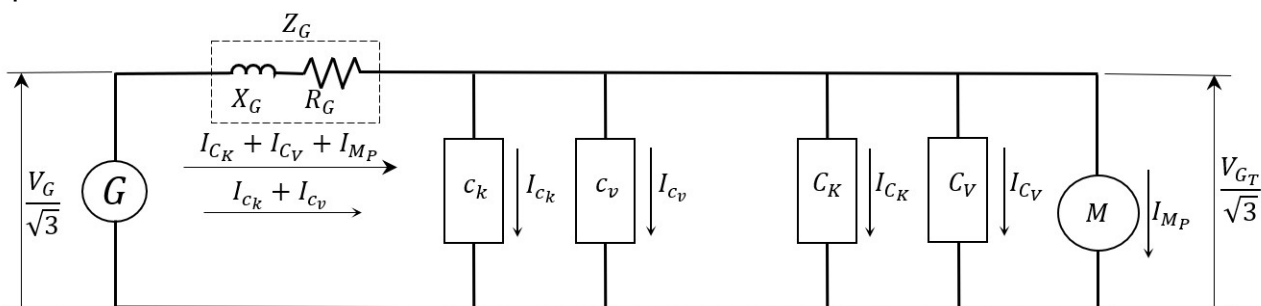
A figura a seguir representa o circuito do alternador, com tensão V_G , alimentando as cargas já em operação normal. A tensão momentânea V_{G_T} é corrigida, pelo regulador de tensão, para a tensão de operação ajustada V_{G_A} , para compensar a queda de tensão na impedância Z_G do alternador.



Na figura abaixo está representado o circuito do alternador alimentando uma carga inicial, e as cargas que serão aplicadas, em conjunto ou individualmente. Observar que, nesta condição o alternador está com a tensão estabilizada na tensão de operação ajustada V_{GA} , nos seus terminais e na carga inicial. Portanto, a tensão V_G no alternador será função da carga inicial e da impedância do alternador. A carga inicial, composta por motores de indução, está incluída na carga de potência constante c_k .



A figura abaixo representa o circuito do alternador, no instante da aplicação das cargas C_K , C_V e motor(es) M , quando o alternador estava alimentando uma carga inicial composta por c_k e c_v . A tensão nos terminais do alternador, em função da aplicação das cargas, passará de V_{GA} para V_{GT} , o que provocará uma variação na corrente das cargas que estavam operando.



Como a tensão V_{GT} será menor que V_{GA} , devido à queda de tensão na impedância do alternador, a corrente na carga constante c_k aumentará e a corrente na carga variável c_v diminuirá. Portanto, as correntes $I_{c_k} + I_{c_v}$ variarão, e a tensão nos terminais do alternador V_{GT} será função das correntes $I_{C_K} + I_{C_V} + I_{M_P} + I_{c_k} + I_{c_v}$.

4 ALTERNADORES

Os alternadores são normalmente de 4 polos, em função da aplicação e rotação dos motores diesel de emergência mais utilizados, com sistema de excitação estática "brushless". A tensão nominal dos alternadores depende da tensão do sistema associado,

a potência depende das necessidades das cargas a serem atendidas e a reatância transitória depende da queda de tensão admissível nas cargas alimentadas.

4.1 Características

As características do alternador que serão utilizadas são:

P_{G_n} Potência nominal do alternador (VA)

V_{G_n} Tensão nominal do alternador (V)

V_{G_A} Tensão de operação ajustada (V)

Z_{G_n} Impedância nominal do alternador (%)

X'_{G_n} Reatância transitória nominal do alternador (%)

4.2 Tensões

A tensão nos terminais do alternador depende do ajuste definido pelo usuário, pois o sistema de regulação de tensão possui uma faixa de ajuste com essa finalidade. A tensão nos terminais do alternador é mantida constante durante o funcionamento do grupo diesel gerador, na tensão de operação ajustada V_{G_A} , variando apenas nos períodos transitórios, quando são aplicadas ou retiradas as cargas. A tensão de operação ajustada V_{G_A} é controlada pelo sistema de regulação de tensão.

A tensão nominal do alternador V_{G_n} normalmente é igual a tensão nominal do sistema associado.

A tensão de operação ajustada do alternador V_{G_A} pode ser igual ou diferente da tensão nominal V_{G_n} , mas dentro da faixa de ajuste do regulador e limites de tensão das cargas.

4.3 Impedância do Alternador

A impedância do alternador Z_G , que será considerada neste documento para calcular a queda de tensão, será:

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

4.4 Resistência do Alternador

A resistência do alternador (R_G) será:

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

4.5 Reatância Transitória do Alternador

A reatância transitória do alternador (X'_G) será:

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

4.6 Ângulo da Impedância

O ângulo da impedância será:

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

Se:

$$R_G = 0$$

$$\theta_G = \arccos 0$$

4.7 Impedância e Ângulo

Como a impedância do alternador, para os cálculos deste documento, será considerada igual a reatância transitória, a impedância e o ângulo considerados serão:

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

$$\theta_G = \arccos 0$$

Onde:

Z_G Impedância do alternador (Ω)

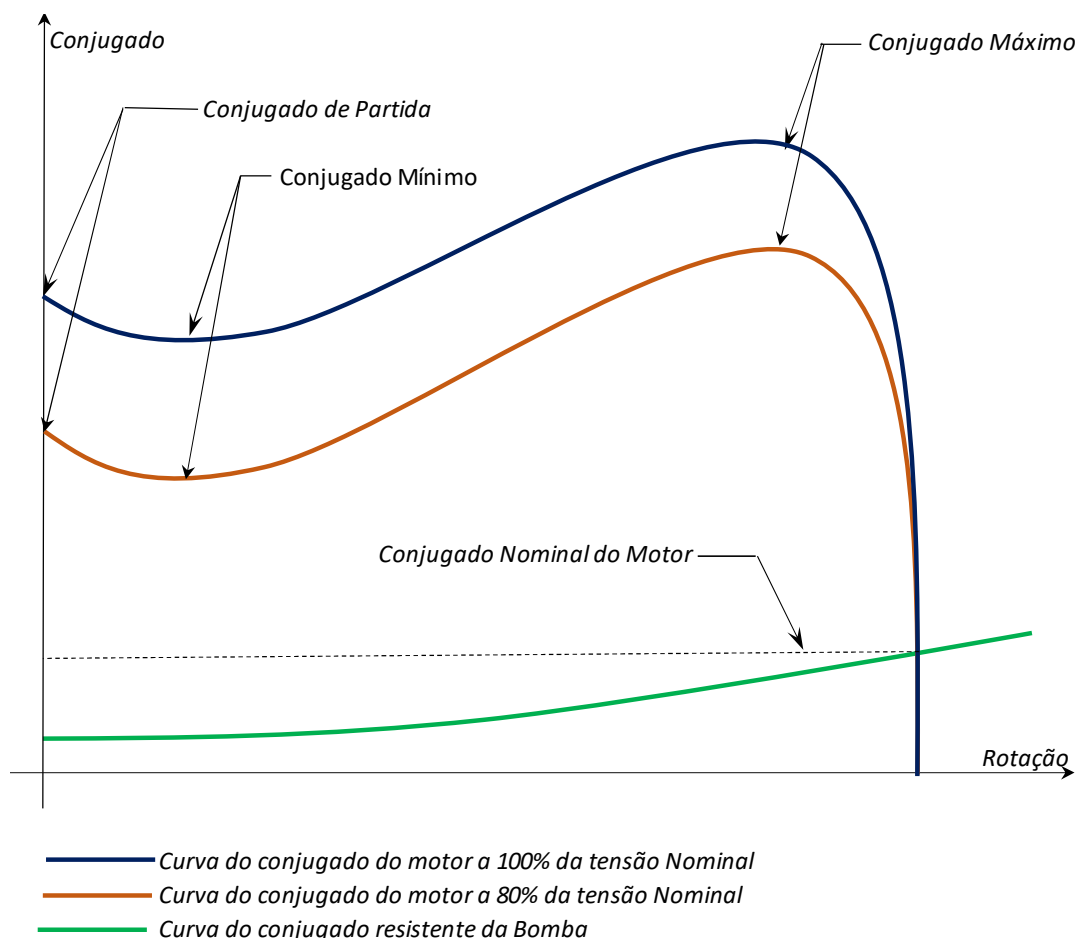
V_{G_n} Tensão nominal do alternador (V)

P_{G_n} Potência nominal do alternador (VA)

X'_{G_n} Reatância transitória nominal do alternador (%)

5 CARGAS DE POTÊNCIA CONSTANTE

Nas cargas de potência constante, a corrente varia em função da tensão para manter a potência constante. Neste caso estão, por exemplo, os carregadores de baterias, sistemas de comunicação e, principalmente, os motores de indução. Os motores indução têm a característica de manter a rotação praticamente constante com a variação de tensão (ver figura abaixo).



$$\text{Potência} = \text{Força} \times \text{Velocidade} \quad \text{ou} \quad \text{Potência} = \text{Torque} \times \text{Velocidade Angular}$$

Observar que o conjugado do motor varia durante a partida do motor e é diferente para cada valor de tensão, mas o conjugado e a rotação se mantêm constantes durante a operação. Portanto, como a carga (Força ou Torque) e a Velocidade se mantêm constantes, a Potência também se mantém constante, ou seja, a variação da corrente é inversamente proporcional à variação da tensão.

5.1 Potência da Carga Constante

A potência da carga constante no circuito é dada por:

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

Onde:

P_{CK} - Potência da carga constante (VA)

V_{GT} – Tensão nos terminais do alternador (V)

Z_{CK} – Impedância da carga constante (Ω)

Na carga constante a potência é constante, e igual à potência nominal da carga, ou seja:

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

Onde:

P_{CKn} - Potência nominal da carga constante (VA)

V_{CKn} – Tensão nominal da carga constante (V)

Z_{CKn} – Impedância nominal da carga constante (Ω)

5.2 Impedância da Carga Constante

Como a potência da carga é constante:

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

5.3 Ângulo da Impedância Carga Constante

Como o fator de potência da carga é, normalmente, um valor arbitrado, por exemplo, igual a 0,85,

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

Onde:

FP_{CK} Fator de potência da carga constante

5.4 Corrente da Carga Constante

Como:

$$\vec{I}_{CK} = \frac{\vec{V}_{GT}}{\vec{Z}_{CK}}$$

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

$$\overrightarrow{I_{C_K}} = \left(\frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}}, -\theta_{C_K} \right)$$

Mas como,

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

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

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

6 CARGAS DE POTÊNCIA VARIÁVEL

Nas cargas de potência variável a impedância é um valor constante. Portanto, a variação da tensão provoca a variação da corrente em função da impedância da carga. Neste caso podemos considerar, por exemplo, cargas compostas por transformadores, reatores e resistores. Nestas cargas a corrente é diretamente proporcional à variação da tensão.

6.1 Potência de Carga Variável

Na carga de potência variável temos que:

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

Onde:

P_{C_V} Potência da carga variável (VA)

V_{G_T} Tensão nos terminais do alternador durante o período transitório (V)

Z_{C_V} Impedância da carga variável (Ω)

A potência nominal da carga variável é:

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

6.2 Impedância da Carga Variável

Ocorre que a carga é variável porque a impedância é constante (por exemplo resistor), logo:

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

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

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

Onde:

$P_{C_{Vn}}$ Potência nominal da carga variável (VA)

$V_{C_{Vn}}$ Tensão nominal da carga variável (V)

$Z_{C_{Vn}}$ Impedância nominal da carga variável (Ω)

6.3 Ângulo da Impedância da Carga Variável

O fator de potência da carga variável pode ser arbitrado ou conhecido. Por exemplo, se for um resistor o fator de potência é 1.

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

Onde:

FP_{C_V} Fator de potência da carga variável

6.4 Corrente da Carga Variável

Como:

$$I_{C_V} = \frac{\frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}}{Z_{C_V}}$$

Mas,

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

$$I_{C_V} = \frac{\frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}}}{\frac{V_{C_{Vn}}^2}{P_{C_{Vn}}}}$$

$$I_{C_V} = \frac{P_{C_{Vn}} V_{G_T}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2}$$

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

7 PARTIDA DE MOTORES

Nas cargas compostas por partida de motor(es), a impedância do(s) motor(es) no instante da partida é fixa. Entretanto, por se tratar de uma condição transitória da carga, será tratada de forma diferenciada.

7.1 Potência de Partida de Motores

Na partida de motor(es) a impedância dos motores é fixa. Portanto, o seu comportamento é o mesmo que as cargas com potência variável.

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

Onde:

P_{M_P} Potência do(s) motor(es) na partida (VA)

V_{G_T} – Tensão nos terminais do alternador durante o período transitório (V)

Z_{M_P} Impedância do(s) motor(es) na partida (Ω)

A potência nominal do(s) motor(es) na partida é:

$$P_{M_{Pn}} = \frac{V_{M_{Pn}}^2}{Z_{M_{Pn}}}$$

Onde:

P_{MPn} Potência nominal do(s) motor(es) na partida (VA)

V_{MPn} Tensão nominal do(s) motor(es) (V)

Z_{MPn} Impedância nominal do(s) motor(es) na partida (Ω)

7.2 Impedância do(s) Motor(es) na Partida

Como a impedância do(s) motor(es) na partida é um valor fixo:

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

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

Como a potência nominal da partida não é um dado fornecido nas tabelas dos fabricantes, utilizaremos a corrente de partida nominal, ou seja:

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

Ou:

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

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

Onde:

P_{MPn} Potência nominal do(s) motor(es) na partida (VA)

V_{MPn} Tensão nominal do(s) motor(es) (V)

I_{MPn} Corrente de partida do(s) motor(es) na tensão nominal (A)

7.3 Ângulo da Impedância do(s) Motor(es) na Partida

O(s) valor(es) do fator de potência do(s) motor(es) na partida pode ser estimado o definido em função dos dados do(s) motor(es). Portanto:

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

Onde:

FP_{MP} Fator de potência do(s) motor(es) na partida

7.4 Corrente na Partida do(s) Motor(es)

Como:

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

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

$$\overrightarrow{I_{M_P}} = \left(\frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}}, -\theta_{M_P} \right)$$

Mas como,

$$Z_{M_P} = \frac{V_{M_{Pn}}}{\sqrt{3}I_{M_{Pn}}}$$

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

8 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO ANALISADAS

No regime permanente de operação dos alternadores, o sistema de regulação de tensão mantém, automaticamente, a tensão no valor de tensão ajustado V_{G_A} , sempre que a carga estiver dentro dos limites da capacidade do alternador.

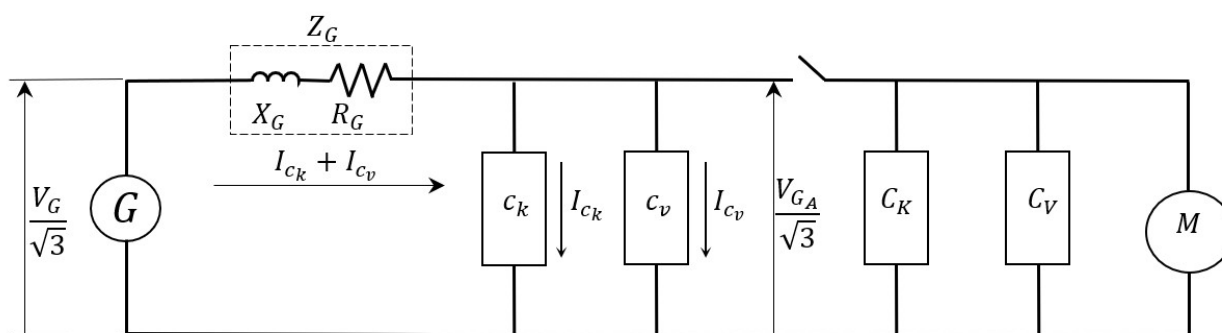
Durante o período transitório da alimentação de uma carga ou conjunto de cargas (com ou sem partida de motor), serão levadas em conta as variações de tensão no alternador. As condições de operação que serão analisadas são:

- Com a aplicação da carga quando o alternador está em vazio (sem carga);
- Com a aplicação da carga quando o alternador está com uma carga inicial.

A apresentação dos cálculos é feita de modo detalhado para permitir o perfeito entendimento da sequência e conceitos adotados, que poderão ser utilizados no desenvolvimento de outras aplicações. Para acompanhar o desenvolvimento usuário deverá ter apenas conhecimento de números complexos, na forma trigonométrica e polar além de, naturalmente, eletrotécnica.

9 TENSÃO NO ALTERNADOR

O cálculo da tensão no alternador será efetuado para atender qualquer condição de operação e qualquer condição de carga.



Para o cálculo da tensão V_G no alternador será considerada a figura do circuito acima, onde:

V_G Tensão no alternador (V)

V_{G_A} Tensão de operação ajustada no alternador (V)

c_k Carga inicial constante (VA)

c_v Carga inicial variável (VA)

I_{c_k} Corrente da carga inicial constante (A)

I_{c_v}	Corrente da carga inicial variável (A)
Z_G	Impedância do alternador (Ω)
R_G	Resistência do alternador (Ω)
X_G	Reatância do alternador (Ω)
C_K	Carga constante (VA)
C_V	Carga variável (VA)
M	Corrente de motor(es) (A)

O alternador está alimentando uma carga constante c_k e uma carga variável c_v . Nesta condição de operação, a tensão V_{GA} nos terminais do alternador é mantida constante pelo regulador automático de tensão.

No caso de aplicação de nova(s) carga(s), constantes C_K , variáveis C_V , ou partida de motor(es) M , a tensão V_{GA} dos terminais do alternador será alterada, transitoriamente, até que o regulador de tensão corrija o valor para a tensão ajustada V_{GA} .

9.1 Tensão no Alternador (V_G) com Carga Inicial

Nesta condição, as cargas compostas por conjunto de motores de indução estão incluídas na carga de potência constante c_k .

Quando o alternador alimenta as cargas, a tensão nos seus terminais será V_{GA} e implicará que a tensão V_G no alternador será dada pela fórmula:

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

Considerando que:

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

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

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

De forma similar às cargas C_K e C_V , serão adotados os mesmos critérios, ou seja, na forma polar:

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

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

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

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

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

Na forma de complexos temos:

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

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

Substituindo $Z_{c_k} = \frac{V_{G_A}^2}{P_{c_{kn}}}$, $Z_{c_v} = \frac{V_{c_{vn}}^2}{P_{c_{vn}}}$ e como $\cos(90 - \theta) = \sin \theta$ e $\sin(90 - \theta) = \cos \theta$ temos:

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

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

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

Com base na fórmula acima, se pode calcular a tensão da geração V_G , quando o alternador alimenta uma carga inicial de potência constante e/ou variável, pela fórmula:

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

9.2 Limite da Tensão V_G do Alternador

A aplicação de cargas em um grupo diesel gerador de emergência depende do operador do equipamento, que deve respeitar as limitações de sobrecarga estabelecidas pelos fabricantes do alternador e do motor diesel. Portanto, essas cargas poderiam superar a potência nominal do alternador. Se a potência das cargas aplicadas for superior aos valores permitidos, poderá ocorrer o aquecimento excessivo do alternador, e/ou queda da frequência em função de redução da velocidade do motor diesel e/ou perda do controle regulação de tensão.

Para quaisquer valores de cargas, mesmo que sejam muito superiores à potência nominal do alternador, se não for estabelecido um limite para o valor V_G da tensão do alternador, a tensão nos terminais seria mantida constante no valor ajustado V_{G_A} , o que não ocorre devido às limitações do regulador de tensão e componentes associados ao grupo.

Para estabelecer o valor máximo da tensão V_G , será considerado que o alternador fornece, continuamente, a potência nominal, com fator de potência 0,8 na tensão V_{G_A} ajustada.

Considerando a fórmula do cálculo da tensão V_G abaixo:

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

Onde:

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

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

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

Apesar da carga inicial poder ser composta por cargas de potência constante ou variável, a carga variável não foi considerada, pois ela varia de acordo com o quadrado da variação da tensão. Portanto, se o valor da tensão ajustada V_{G_A} for diferente da *tensão* nominal do alternador, a potência solicitada pela carga variável, ainda que sua tensão nominal seja igual à do alternador, será diferente da potência nominal do alternador. Por exemplo, se o valor da tensão ajustada for 110% da tensão nominal do alternador, a potência solicitada por uma carga variável, com tensão e potência nominais iguais à do alternador, será 121% da potência nominal da carga variável, o que comprometeria o conceito aqui adotado, exceto se se considerasse uma carga com potência variável de 82,64% (100/121) da potência nominal do alternador em vez de 100%.

Logo, a tensão máxima considerada para V_G será:

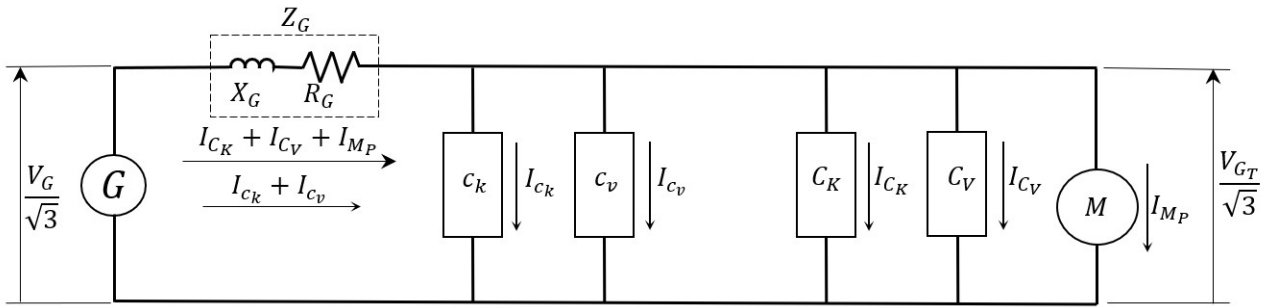
$$V_G = \sqrt{3} \left(\left[\frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \left(\frac{0,6P_{G_n}}{V_{G_A}} + \frac{0 \cdot V_{G_A} \sin \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n}}{100\sqrt{3} P_{G_n}} \right]^2 + \left[\left(\frac{0,8P_{G_n}}{V_{G_A}} + \frac{0 \cdot V_{G_A} \cos \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2}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

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

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

O valor da tensão V_G do alternador corresponderá ao valor da tensão V_{G_A} de operação ajustada.

9.3 Tensão nos Terminais do Alternador na Aplicação de Carga(s)



A figura acima representa o circuito do alternador, que estava alimentando uma carga inicial composta por c_k e c_v , no instante da aplicação das cargas C_K , C_V e motor M .

A tensão nos terminais do alternador, em função da aplicação das cargas, C_K , C_V e motor M , passará de V_{G_A} para V_{G_T} , o que provocará uma variação nas correntes I_{c_k} e I_{c_v} das cargas que estavam operando, mas a tensão V_G no alternador será, transitoriamente, a mesma tensão que quando alimentava somente as cargas iniciais c_k e c_v .

Como a tensão V_{G_T} será menor que V_{G_A} , devido à queda de tensão na impedância do alternador, a corrente na carga constante c_k aumentará e a corrente na carga variável c_v diminuirá. Portanto, a tensão nos terminais do alternador V_{G_T} será função das correntes $I_{C_K} + I_{C_V} + I_{M_P} + I_{c_k} + I_{c_v}$ e da tensão V_G .

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

Onde:

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

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

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

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

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

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

$$\overrightarrow{I_{C_v}} = \left(\frac{P_{c_{vn}} V_{G_T}}{\sqrt{3}V_{C_{vn}}^2}, -\theta_{C_v} \right)$$

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

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

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

Na forma de complexos temos:

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

$$\begin{aligned}
 & + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{M_P}) + j \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{V_{M_{Pn}}} \cdot \frac{X'_{G_n} I_{M_{Pn}}}{100 P_{G_n}} \sin(90 - \theta_{M_P}) + \\
 & + \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Kn}}}{100 P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{C_K}) + j \frac{V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{G_T}} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Kn}}}{100 P_{G_n}} \sin(90 - \theta_{C_K}) + \\
 & + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Vn}}}{100 P_{G_n}} \cos(90 - \theta_{C_V}) + j \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \cdot \frac{X'_{G_n} P_{C_{Vn}}}{100 P_{G_n}} \sin(90 - \theta_{C_V})
 \end{aligned}$$

Como $\cos(90 - \theta) = \sin\theta$ e $\sin(90 - \theta) = \cos\theta$

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

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

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

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

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

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

Se considerarmos 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 escrever a equação em destaque 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 temos:

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

A solução da equação acima será a raiz real e positiva da equação abaixo;

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

Onde:

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

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

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

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

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

A fórmula acima fornece o valor da tensão nos terminais do alternador, não só quando está com carga permanente, constante e/ou variável, mas também quando está com uma carga inicial e se aplica uma carga composta por outras cargas (constantes e/ou variáveis) e partida de motor(es), em conjunto ou individualmente.

10 REATÂNCIA TRANSITÓRIA DO ALTERNADOR

Para calcular a reatância transitória do alternador, utilizaremos as fórmulas do cálculo das tensões no alternador, sem e com carga inicial.

No Cálculo da Tensão no Alternador, apenas com carga inicial, vimos que:

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

No Cálculo da Tensão no Alternador, com carga inicial e aplicação de cargas, vimos que:

$$\left| \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} \right|^2 = \left[\frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \sin \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \sin \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} \sin \theta_{M_P}}{100 V_{M_{Pn}} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \sin \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \sin \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} \right]^2 + \left[\frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \cos \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \cos \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} I_{M_{Pn}} \cos \theta_{M_P}}{100 V_{M_{Pn}} P_{G_n}} + \frac{V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Kn}} \cos \theta_{C_K}}{100\sqrt{3} V_{G_T} P_{G_n}} + \frac{V_{G_T} V_{G_n}^2 X'_{G_n} P_{C_{Vn}} \cos \theta_{C_V}}{100\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2 P_{G_n}} \right]^2$$

Estando o alternador com uma carga inicial, a tensão V_G do alternador não se altera instantaneamente quando se aplica(m) nova(s) carga(s). Portanto, como se o regulador de tensão não existisse, a tensão V_G do alternador, no instante da aplicação da(s) nova(s) carga(s), será a mesma tensão que o alternador tinha quando estava alimentado apenas as cargas iniciais. A queda de tensão nos terminais do alternador será consequência da variação da corrente, na impedância do alternador, devida à aplicação da(s) nova(s) carga(s) e variação da corrente nas cargas iniciais. Após a aplicação da(s) nova(s) carga(s), a tensão V_G do alternador será ajustada, pelo regulador automático de tensão, para que a tensão nos terminais do alternador corresponda ao valor da tensão ajustada V_{G_A}

Pelo exposto, igualando os valores de $\left| \frac{\vec{V}_G}{\sqrt{3}} \right|^2$ das duas equações acima destacadas, temos:

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

$$\left[\frac{V_{G_A}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} \sin \theta_{C_K}}{V_{G_A}} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_A} P_{C_{Vn}} \sin \theta_{C_V}}{V_{C_{Vn}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 + \left[\frac{P_{C_{Kn}} \cos \theta_{C_K}}{V_{G_A}} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_A} P_{C_{Vn}} \cos \theta_{C_V}}{V_{C_{Vn}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100\sqrt{3} P_{G_n}} X'_{G_n} \right]^2 =$$

$$= \left[\frac{V_{G_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} \sin \theta_{C_K}}{\sqrt{3} V_{G_T}} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \frac{V_{G_T} P_{C_{Vn}} \sin \theta_{C_V}}{\sqrt{3} V_{C_{Vn}}^2} \frac{V_{G_n}^2}{100 P_{G_n}} X'_{G_n} + \right]$$

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

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

Se considerarmos que:

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

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

$$b_1 = \left(\frac{P_{c_{kn}} \sin \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \sin \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 \sqrt{3} P_{G_n}}$$

$$c_1 = \left(\frac{P_{c_{kn}} \cos \theta_{c_k}}{V_{G_A}} + \frac{V_{G_A} P_{c_{vn}} \cos \theta_{c_v}}{V_{c_{vn}}^2} \right) \frac{V_{G_n}^2}{100 \sqrt{3} P_{G_n}}$$

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

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

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

Podemos escrever a equação em destaque como:

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

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

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

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

A solução da equação acima será a raiz real e positiva da equação abaixo;

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

Onde:

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

$$c = 2a_2b_2 - 2a_1b_1$$

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

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

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

Onde X'_{G_n} é o valor máximo calculado para reatância transitória do alternador, que atende às necessidades definidas pelo usuário.

11 ELABORAÇÃO DAS PLANILHAS EXCEL

As planilhas Excel foram elaboradas com base nos conceitos desenvolvidos neste informativo. A parte teórica não é indispensável para sua utilização, mas é importante para o entendimento do problema e eventual desenvolvimento de estudos mais aprofundados.

Foram elaboradas duas planilhas para determinar a reatância transitória do alternador, e duas para calcular a tensão nos terminais do alternador. Para cada cálculo existe uma completa e outra simplificada, ambas em um único arquivo. Nas planilhas completas estão indicadas as fórmulas e termos utilizados no cálculo e, nas simplificadas, que são idênticas às completas, apenas as informações básicas estão visíveis.

Como as duas planilhas são idênticas, os campos e informações da planilha completa que não são visíveis na planilha simplificada, estão ocultos, mas continuam ativos. Portanto, qualquer alteração, ou introdução de informações, deve ser feita com cuidado para não corromper o arquivo.

As planilhas podem ser utilizadas para sistemas de 50 ou 60Hz, com as devidas adequações, e para quaisquer valores de tensão dos sistemas e das cargas.

Como em uma instalação podem existir cargas com tensões nominais diferentes da do sistema, existem os campos para preenchimento destas informações. Por exemplo, podem existir motores e cargas com tensões nominais de 220V, 380V, 440V, 460V, 480, etc.

Os campos com fatores de potência das cargas também foram deixados para serem preenchidos com os dados reais.

As planilhas são para todos os casos, ou seja, o alternador pode estar ou não com carga inicial, esta carga inicial pode ser formada por carga constante ou variável. A carga a ser

aplicada, estando o alternador com carga inicial, pode ser uma ou mais tipos de cargas, constantes, variáveis ou motor(es).

A referência feita a motor(es) é para permitir que se considere um único motor ou conjunto de motores, cujos dados devem ser definidos pelo usuário. Por exemplo, se se desejam determinar os valores da reatância transitória e a tensão nos terminais do alternador, com a partida simultânea de dois motores com características diferentes, deverão ser informados nas planilhas, os valores equivalentes das correntes de partida e fator de potência correspondentes aos dois motores.

Para evitar erros e incoerências nos resultados, o preenchimento dos campos das planilhas deve ser feito corretamente e, os dados informados, devem ser coerentes com as limitações dos equipamentos e cargas.

11.1 Planilhas do Cálculo da Reatância Transitória

As planilhas do cálculo da reatância transitória do alternador foram elaboradas para definir o valor máximo da reatância transitória, que garanta que a tensão nos terminais do alternador seja igual ou superior ao valor definido pelo usuário, considerando que o grupo esteja operando com cargas iniciais ou em vazio e, durante a operação normal, sejam aplicadas, individualmente ou em conjunto, cargas de potência constante, variável ou partida de motores.

Como os valores das reatâncias transitórias, normalmente não correspondem às potências nominais dos alternadores encontrados no mercado, o usuário deve escolher a combinação da potência nominal e reatância transitória, que atenda suas necessidades.

11.2 Planilhas do Cálculo da Tensão nos Terminais

As planilhas do cálculo da tensão nos terminais do alternador foram elaboradas para, com base nos dados do alternador e das cargas, determinar a tensão nos seus terminais para desenvolver os estudos do comportamento dos sistemas e calcular os demais componentes da instalação.

Especial atenção deve ser dada ao valor da tensão de operação ajustada, pois este valor pode ser superior à tensão nominal do alternador e do sistema. Tratando-se de grupos de emergência, este valor pode estar próximo do valor máximo suportável pelos componentes da instalação. Devem ser respeitados os limites de ajustes de tensão e potências das cargas, para que não ultrapassem os limites estabelecidos pelo equipamento e pelas cargas.

A potência contínua total, aplicada ao alternador, não deve ultrapassar a potência admissível, definida pelo fabricante do grupo gerador. A potência contínua total aplicada pode até ser maior que a potência nominal do alternador, mas o seu valor e o tempo de duração devem ser definidos e administrados pelo usuário.

Importante: Teoricamente, quando o grupo está operando com carga permanente, a tensão nos terminais do alternador será mantida constante pelo regulador automático de tensão, no valor ajustado pelo usuário, para quaisquer valores de cargas que estejam dentro das capacidades do grupo.

Para efeito dos cálculos da tensão nos terminais do alternador, o valor máximo da tensão V_G do alternador foi limitado em função valor máximo da tensão de ajuste de operação V_{GA} , estando o alternador operando com potência e fator de potência nominais. Normalmente, o valor da tensão máxima ajustada V_{GA} é de 110% da tensão nominal. Portanto, para estes

casos, a tensão máxima V_G do alternador deverá considerar que a potência fornecida pelo grupo é a potência nominal do alternador, com um fator de potência igual a 0,8.

12 EXEMPLO COMENTADO DE APLICAÇÃO

As planilhas permitem que o usuário simule, rapidamente, muitas alternativas. Entretanto, neste informativo serão feitas apenas algumas destas simulações.

12.1 Exemplo

Considerando que em uma instalação se deseja calcular a reatância transitória e as tensões nos terminais de um alternador, cuja potência nominal necessária foi definida em 1000kVA e que:

- 1 - A tensão nominal do sistema: 480V
- 2 - Tensão nominal do alternador: 480V.
- 3 – Tensão mínima admitida nos terminais do alternador: 95% da tensão nominal, ou seja, 456V.
- 4 – A tensão de operação do alternador será ajustada em 105% da tensão nominal, ou seja, 504V.
- 5 - A carga inicial do grupo, composta por cargas de potência constante, totaliza 350kVA, com tensão nominal de 460V e fator de potência 0,85.
- 6 - A carga inicial do grupo, composta por cargas de potência variável, totaliza 250kVA, com tensão nominal de 480V e fator de potência 0,9.
- 7 - Estando o grupo operando com a carga inicial, será conectada a alimentação de um quadro com as seguintes cargas, que serão aplicadas em conjunto:
 - Carga de potência constante de 50kVA, 460V e fator de potência 0,85.
 - Carga de potência variável de 100kVA, 480V e fator de potência 0,9.
 - Um motor de indução de 75hp, 460V, corrente de partida 710A com fator de potência 0,30.
 - Um motor de indução de 30hp, 460V, corrente de partida 320A com fator de potência 0,35.

12.2 Escolha do Alternador

Como a potência nominal do alternador foi definida com base em um estudo, que não é escopo deste informativo, a primeira providência é a de determinar a reatância transitória o alternador com base nos dados fornecidos.

Para poder preencher a planilha do cálculo da reatância transitória é necessário calcular a corrente de partida e fator de potência equivalente dos motores de 75hp e 30hp, que é mostrado na tabela abaixo:

Motor	Tensão Nominal	Corrente de Partida	fator de Potência
75hp	460	710	0,3
30hp	460	320	0,35
Equivalente	460	1030	0,32

Preenchendo a planilha com os dados temos:

DADOS DO SISTEMA				
Alternador	VG_n	Tensão Nominal do Alternador (V)	480	
	VG_A	Tensão de Operação Ajustada no Alternador (V)	504	
	PG_n	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1000	
	VG_T	Tensão nos terminais do Alternador (V)	456	
Dados das Cargas	Inicial	PC_{kn}	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)	350
		VC_{kn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)	460
		FPC_k	Fator de Potência da Carga Inicial Constante	0,85
		PC_{vn}	Potência Nominal da Carga Inicial Variável (kVA)	250
		VC_{vn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Variável (V)	480
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Inicial Variável	0,9
	Carga a ser Aplicada	PC_{Kn}	Potência Nominal da Carga Constante (kVA)	50
		VC_{Kn}	Tensão Nominal da Carga Constante (V)	460
		FPC_K	Fator de Potência da Carga Constante	0,85
		PC_{vn}	Potência Nominal da Carga Variável (kVA)	100
		VC_{vn}	Tensão Nominal da Carga Variável (V)	480
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Variável	0,9
		VM_{Pn}	Tensão Nominal do(s) Motor(es) (V)	460
		IM_{Pn}	Corrente de Partida do(s) Motor(es) na Tensão Nominal (A)	1030
		FPM_P	Fator de Potência do(s) Motor(es) na Partida	0,32

Reatância transitória do alternador	$X'G_n$ (%)	10,98
-------------------------------------	-------------	-------

Ou seja, o alternador de 1000kVA que atenda a necessidade acima deveria ter uma reatância transitória nominal máxima de 10,98%. Dos dados dos alternadores da WEG, linha AG10, temos os dados abaixo:

Modelo		480 V - Y / 240 V - YY					
		ΔT	80 °C	105 °C	125 °C	150 °C	163 °C
Linha AG10 - AG10	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	Xd' (%) 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

Com base na potência nominal, podemos escolher o alternador Modelo 315MI40AI de 1040kVA. A reatância transitória nominal, em 440V, é 17,18%, que referida à tensão de 480V e potência e 1000kVA é:

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

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

Este alternador não atende o valor calculado de 10,98%.

Passando para o alternador Modelo 355MI70AI de 1400kVA, cuja reatância transitória nominal, em 440V, é 16,5%, que referida à tensão de 480V e potência e 1000kVA é:

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

O alternador atende aos requisitos exigidos.

12.3 Tensões nos Terminais do Alternador

A tensão nominal do alternador Modelo 355MI70AI será 480 e a reatância nominal referida à tensão de 480V e potência de 1400kVA será:

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

A tensão nos terminais do alternador Modelo 355MI70AI de 1400kVA, nas condições definidas no exemplo será 460,48V, ou seja, superior ao valor mínimo exigido de 456V.

DADOS DO SISTEMA				
Alternador	VG_n	Tensão Nominal do Alternador (V)	480	
	VG_A	Tensão de Operação Ajustada do Alternador(V)	504	
	PG_n	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1400	
	$Z'G_n$	Reatância Transitória Nominal do Alternador (%)	13,865	
Dados das Cargas	Inicial	Pc_{kn}	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)	350
		Vc_{kn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)	460
		FPC_k	Fator de Potência da Carga Inicial Constante	0,85
		Pc_{vn}	Potência Nominal da Carga Inicial Variável (kVA)	250
		Vc_{vn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Variável (V)	480
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Inicial Variável	0,9
	Carga a ser Aplicada	PC_{Kn}	Potência Nominal da Carga Constante (kVA)	50
		VC_{Kn}	Tensão Nominal da Carga Constante (V)	460
		FPC_K	Fator de Potência da Carga Constante	0,85
		PC_{vn}	Potência Nominal da Carga Variável (kVA)	100
		VC_{vn}	Tensão Nominal da Carga Variável (V)	480
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Variável	0,9
		VM_{Pn}	Tensão Nominal do(s) Motor(es) (V)	460
		IM_{Pn}	Corrente de Partida do(s) Motor(es) na Tensão Nominal (A)	1030
		FPM_P	Fator de Potência do(s) Motor(es) na Partida	0,32

V_{G_T} - Tensão no Terminais do Alternador (V)

$V_{G_T}(V)$ 460,48

12.4 Comentários

Como se pode verificar, a utilização das planilhas permite fazer muitas simulações e analisar alternativas que podem ser adotadas, verificando o comportamento das tensões para várias situações de carga.

Como dificilmente se vai encontrar um alternador com a potência nominal definida e reatância transitória nominal calculada com auxílio da planilha, a melhor solução é a de, consultando os dados dos alternadores existentes no mercado, escolher o que mais se aproxima das características necessárias, assim como foi feito no exemplo.

A escolha do alternador de potência nominal de 1400kVA não implica que o grupo diesel gerador deva ter essa capacidade. Portanto, o grupo pode ter uma potência nominal de 1000kVA com alternador de 1400kVA.

Através de simulações, se podem explorar outras situações que podem vir a satisfazer as necessidades da instalação, sem ser exatamente àquelas definidas inicialmente. Por exemplo, se pode reduzir o valor da tensão mínima admissível nos terminais do alternador, aumentar o valor da tensão de operação ajustada, ou ainda, combinando as duas opções.

Uma alternativa que será analisada é a alteração nas condições de operação. Por exemplo, retardar a partida do motor de 75hp por alguns segundos, ou seja, em uma primeira fase se aplica a carga considerada, exceto o motor de 75hp, que se aplicaria na segunda fase.

Considerando o alternador Modelo 315MI40AI de 1040kVA, a reatância transitória de 17,7%, em 440V, referida à tensão de 480V será:

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

DADOS DO SISTEMA				
Alternador		VG_n	Tensão Nominal do Alternador (V)	480
		VG_A	Tensão de Operação Ajustada do Alternador(V)	504
		PG_n	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1040
		$Z'G_n$	Reatância Transitória Nominal do Alternador (%)	14,873
Dados das Cargas	Inicial	Pc_{kn}	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)	350
		Vc_{kn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)	460
		FPC_k	Fator de Potência da Carga Inicial Constante	0,85
		Pc_{vn}	Potência Nominal da Carga Inicial Variável (kVA)	250
		Vc_{vn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Variável (V)	480
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Inicial Variável	0,9
	Carga a ser Aplicadda	PC_{Kn}	Potência Nominal da Carga Constante (kVA)	50
		VC_{Kn}	Tensão Nominal da Carga Constante (V)	460
		FPC_K	Fator de Potência da Carga Constante	0,85
		PC_{vn}	Potência Nominal da Carga Variável (kVA)	100
		VC_{vn}	Tensão Nominal da Carga Variável (V)	480
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Variável	0,9
		VM_{pn}	Tensão Nominal do(s) Motor(es) (V)	460
		IM_{pn}	Corrente de Partida do(s) Motor(es) na Tensão Nominal (A)	320
		FPM_p	Fator de Potência do(s) Motor(es) na Partida	0,35

V_{G_T} - Tensão no Terminais do Alternador (V)

$V_{G_T}(V)$ 479,79

Portanto, a tensão nos terminais do alternador seria 479,79V na primeira fase.

DADOS DO SISTEMA				
Alternador	VG_n	Tensão Nominal do Alternador (V)	480	
	VG_A	Tensão de Operação Ajustada do Alternador(V)	504	
	PG_n	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1040	
	$Z'G_n$	Reatância Transitória Nominal do Alternador (%)	14,873	
Dados das Cargas	Inicial	PC_{kn}	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)	430
		VC_{kn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)	460
		FPC_k	Fator de Potência da Carga Inicial Constante	0,85
		PC_{vn}	Potência Nominal da Carga Inicial Variável (kVA)	350
		VC_{vn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Variável (V)	480
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Inicial Variável	0,9
	Carga a ser Aplicadda	PC_{Kn}	Potência Nominal da Carga Constante (kVA)	
		VC_{Kn}	Tensão Nominal da Carga Constante (V)	
		FPC_K	Fator de Potência da Carga Constante	
		PC_{vn}	Potência Nominal da Carga Variável (kVA)	
		VC_{vn}	Tensão Nominal da Carga Variável (V)	
		FPC_v	Fator de Potência da Carga Variável	
		VM_{Pn}	Tensão Nominal do(s) Motor(es) (V)	460
		IM_{Pn}	Corrente de Partida do(s) Motor(es) na Tensão Nominal (A)	710
		FPM_P	Fator de Potência do(s) Motor(es) na Partida	0,3

V_{GT} - Tensão no Terminais do Alternador (V)	$V_{GT}(V)$	463,40
--	-------------	--------

Na segunda fase, onde somente ocorre a partida do motor de 75hp, com diferença de poucos segundos depois da primeira (tempo de estabilização da tensão nos terminais do alternador). Durante a partida do motor de 75hp, a tensão nos terminais do alternador será 463,40V. Nesta fase, considerando que o motor é uma carga de potência constante e que 1hp=1kVA, a carga do motor de 30hp está incluída na carga inicial de potência constante.

12.5 Comentários Adicionais

Nestes comentários serão abordados os problemas de sobrecargas com a limitação de tensão V_G do alternador, que alteram a tensão de operação V_{GA} ajustada, e compatibilidade dos valores das cargas.

12.5.1 Limitação de Tensão V_G do Alternador

Como, teoricamente, o regulador de tensão deveria manter constante a tensão nos terminais do alternador, para qualquer valor de carga aplicada e desde que o motor diesel tenha capacidade para isto, o valor da tensão V_G deveria ser ilimitado. Entretanto, como isto não ocorre, nas planilhas deste informativo foi estabelecido que, o valor máximo da tensão V_G será a tensão calculada quando o alternador alimenta uma carga constante de potência igual à potência nominal do alternador, com fator de potência 0,8 (padrão normal de fabricantes de grupos), e tensão nominal da carga igual às tensões nominais do alternador e do sistema, e para tensão de operação V_{GA} ajustada.

Para o alternador Modelo 355MI70AI, 1400kVA, 480V, reatância transitória nominal 13,865%, tensão de operação V_{GA} ajustada em 504V, a tensão nos terminais do alternador

será 504V, como ajustado, e a tensão V_G máxima do alternador, para o valor V_{GA} ajustada será 544,40V, que se pode verificar nas informações da planilha completa.

DADOS DO SISTEMA				
Alternador	VG_n	Tensão Nominal do Alternador (V)	480	
	VG_A	Tensão de Operação Ajustada do Alternador(V)	504	
	PG_n	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1400	
	$Z'G_n$	Reatância Transitória Nominal do Alternador (%)	13,865	
Dados das Cargas	Inicial	Pc_{kn}	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)	1400
		Vc_{kn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)	480
		FPC_k	Fator de Potência da Carga Inicial Constante	0,8
V_{GT} - Tensão no Terminais do Alternador (V)			$V_{GT}(V)$	504,00

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

$V_G(V)$ 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 - Tensão no Alternador (V)

Se o valor da tensão ajustada for, por exemplo 528V (480V + 10%), a tensão nos terminais do alternador será 528V e a tensão V_G máxima do alternador será 566,37V.

DADOS DO SISTEMA				
Alternador	VG_n	Tensão Nominal do Alternador (V)	480	
	VG_A	Tensão de Operação Ajustada do Alternador(V)	528	
	PG_n	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1400	
	$Z'G_n$	Reatância Transitória Nominal do Alternador (%)	13,865	
Dados das Cargas	Inicial	Pc_{kn}	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)	1400
		Vc_{kn}	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)	480
		FPC_k	Fator de Potência da Carga Inicial Constante	0,8
V_{G_T} - Tensão no Terminais do Alternador (V)			$V_{G_T}(V)$	528,00

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

$V_G(V)$ 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 - Tensão no Alternador (V)

Com a limitação da tensão máxima de V_G , se a carga for superior à potência nominal do alternador, o valor da tensão nos terminais do alternador será inferior ao valor de operação ajustado V_{G_A} , devido ao limite imposto.

Considerando que a carga do alternador, em vez de 1400kVA seja de 1800kVA, para o valor da tensão de operação V_{G_A} ajustada em 504V a tensão nos terminais será 489,95V, em vez de 504V.

DADOS DO SISTEMA			
Alternador	V_{G_n}	Tensão Nominal do Alternador (V)	480
	V_{G_A}	Tensão de Operação Ajustada do Alternador(V)	504
	P_{G_n}	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1400
	Z'_{G_n}	Reatância Transitória Nominal do Alternador (%)	13,865
Dados das Cargas	Inicial	$P_{c_{kn}}$	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)
		$V_{c_{kn}}$	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)
		F_{Pc_k}	Fator de Potência da Carga Inicial Constante
			0,8

V_{G_T} - Tensão no Terminais do Alternador (V)	$V_{G_T}(V)$	489,95
---	--------------	--------

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

$$V_{G(V)} = 556,73$$

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

$$V_{G(V)} = 544,40$$

$$V_{G(V)} = 544,40$$

V_G - Tensão no Alternador (V)

Observar na planilha completa, que a tensão V_G do alternador foi limitada em 544,40V para a tensão V_{G_A} ajustada em 504V, mas para manter a tensão no valor ajustado, a tensão V_G do alternador deveria ser 556,73V.

DADOS DO SISTEMA			
Alternador	V_{G_n}	Tensão Nominal do Alternador (V)	480
	V_{G_A}	Tensão de Operação Ajustada do Alternador(V)	528
	P_{G_n}	Potência Nominal do Alternador (kVA)	1400
	Z'_{G_n}	Reatância Transitória Nominal do Alternador (%)	13,865
Dados das Cargas	Inicial	$P_{c_{kn}}$	Potência Nominal da Carga Inicial Constante (kVA)
		$V_{c_{kn}}$	Tensão Nominal da Carga Inicial Constante (V)
		F_{Pc_k}	Fator de Potência da Carga Inicial Constante
			0,8

V_{G_T} - Tensão no Terminais do Alternador (V)	$V_{G_T}(V)$	514,91
---	--------------	--------

Para o valor da tensão de operação V_{G_A} ajustada em 528V, a tensão nos terminais será 514,91V, em vez de 528V.

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

$V_G(V)$ 578,03

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

$V_G(V)$ 566,37

$V_G(V)$ 566,37

V_G - Tensão no Alternador (V)

Do mesmo modo, a tensão V_G do alternador foi limitada em 566,37V para a tensão V_{G_A} ajustada em 528V, mas para manter a tensão no valor ajustado, a tensão V_G do alternador deveria ser 578,03V.

Caso se deseje deixar de limitar o valor máximo da tensão V_G do alternador, se deve impor outro limite. Por exemplo, considerando o exemplo citado, em que a carga do alternador, em vez de 1400kVA seja de 1800kVA, para o valor da tensão de operação V_{G_A} ajustada em 528V a tensão nos terminais será 514,91V, em vez de 528V porque a tensão V_G foi limitada em 566,37V.

Se impusermos o valor de 578,03V para V_G , veremos que a tensão nos terminais será mantida no valor da tensão de operação V_{G_A} ajustado. O valor a ser imposto deve ser digitado na planilha completa, no campo indicado na figura abaixo:

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

$V_G(V)$ #DIV/0!

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

$V_G(V)$ 578,03

$V_G(V)$ #DIV/0!

V_G - Tensão no Alternador (V)

Dessa forma, para as cargas de, por exemplo, 800kVA, 1400kVA e 1800kVA, a tensão nos terminais do alternador será mantida no valor ajustado, com as seguintes informações da planilha completa:

Para 800kVA:

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

$V_G(V)$ 549,44

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

$V_G(V)$ 578,03

$V_G(V)$ 549,44

V_G - Tensão no Alternador (V)

Para 1400kVA:

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

$V_G(V)$ 566,37

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

$V_G(V)$ 578,03

$V_G(V)$ 566,37

V_G - Tensão no Alternador (V)

Para 1800kVA:

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

$V_G(V)$ 578,03

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

$V_G(V)$ 578,03

$V_G(V)$ 578,03

V_G - Tensão no Alternador (V)

12.5.2 Compatibilidade de Informações e Valores

As informações dos valores a serem preenchidos nas planilhas devem ser observadas para que os cálculos sejam mais precisos. Essas informações são:

a) Para Alternadores:

Potências nominais, tensões nominais, tensões de operação ajustadas, faixas de ajustes das tensões de operação, valores de sobrecargas e sua duração, reatâncias transitórias e referência de valores. A aplicação dos cuidados com estas informações foi explorada no exemplo considerado neste informativo.

b) Para as Cargas de Potência Constante:

Potências nominais, tensões nominais, fator de potência. Na aplicação destas cargas, estando o alternador com ou sem carga inicial, estes valores devem ser informados pois são utilizados nos cálculos. Entretanto, quando se consideram como carga inicial, existe uma diferença entre o valor das cargas individuais e o valor equivalente. Por exemplo, considerando um alternador:

- Sem carga e a aplicação de uma carga constante de, por exemplo, 100kVA, tensão nominal 460V, fator de potência 0.9.

- Com a carga inicial constante de 100kVA fator de potência 0,9 e a aplicação de uma carga constante de 200kVA, tensão nominal 480V, fator de potência 0.8.

Após a aplicação da segunda carga constante, estando o alternador com a carga inicial, a carga final será uma carga constante equivalente de:

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

(1) Para todos os efeitos, como a carga é de potência constante, o valor da tensão nominal da carga não é relevante. Portanto, pode ser 480V ou 460V.

A carga total será a soma das duas potências nominais.

c) Para as Cargas de Potência Variável:

Potências nominais, tensões nominais, fator de potência. Na aplicação destas cargas, estando o alternador com ou sem carga inicial, estes valores devem ser informados pois são utilizados nos cálculos. Entretanto, quando se consideram como carga inicial, também existe uma diferença entre o valor das cargas individuais e o valor equivalente. Por exemplo, considerando um alternador:

- Sem carga e a aplicação de uma carga variável de, por exemplo, 100kVA, tensão nominal 480V, fator de potência 0.9.

- Com a carga inicial variável de 100kVA fator de potência 0,9 e a aplicação de uma carga variável de 200kVA, tensão nominal 440V, fator de potência 0.8.

Após a aplicação da segunda carga variável, estando o alternador com a carga inicial, a carga final será uma carga variável de:

Cargas de Potência Variável				
Carga (KVA)	Tensão Nominal	Fator de Potência	kW	kVAR
100	480	0,9	90	44
200	440	0,8	190	143
337	(1)	0,83	280	186

(1) Como a carga é de potência variável, o valor da tensão nominal das cargas deve ser o mesmo, pois a potência varia com o quadrado da variação da tensão. De preferência, adotar o valor da tensão nominal da carga inicial, no caso 480V.

d) Para Motores:

A aplicação dos cuidados com estas informações foi explorada no exemplo considerado neste informativo.

e) Observações

A aplicação dos cuidados com a compatibilidade das unidades e valores das cargas é uma prática para se obter maior precisão no resultado. Portanto, estes cuidados não necessitam ser tão rigorosos para cálculos aproximados.

As correções de valores não são necessárias para a aplicação de cargas, de potência constante e/ou variável, quando o alternador está com carga inicial.