

BC/GSP/11

VI SEMINÁRIO NACIONAL DE
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO IV

SISTEMAS DE POTÊNCIA

(G S P)

GERAÇÃO DE HARMÔNICO POR COMPENSADORES ESTÁTICOS
DO TIPO REATOR CONTROLADO POR TIRISTORES

Autores: Ricardo Ferreira Pinheiro
José Carlos de Oliveira
João Roberto Cogo

Entidade: EFEI

Balneário Camboriú - SC - Brasil
1981

1 - EQUACIONAMENTO E FORMA DE ONDA

A FIGURA 1.1 mostra esquematicamente um dos ramos do delta de conexão de um reator controlado por tiristores. Escolhendo-se a referência dos tempos no instante em que a tensão aplicada ao ramo é nula, vem que, devido ao atraso natural da corrente em relação à tensão num reator, a partir de $\omega t = \pi/2$ é possível provocar o disparo do tiristor 1. Analogamente, a partir de $\omega t = 3\pi/2$ é possível disparar o tiristor 2 e assim sucessivamente. Este atraso entre o instante em que a tensão passa por um zero natural e o instante do disparo do tiristor correspondente, denomina-se “ângulo de disparo”. Desta forma, o ângulo de disparo (α) irá variar entre 90° (quando o reator conduzirá normalmente como se os tiristores estivessem curtos-circuitos) e 180° (quando a chave constituída pelos tiristores será equivalente a um circuito aberto e não fluirá corrente pelo reator). A FIGURA 1.2 mostra as formas de onda de corrente e tensão em um ramo do compensador para um ângulo de disparo qualquer (α). Note-se claramente um leve amortecimento nos pulsos de corrente devido à presença de elementos resistivos no circuito.

Sendo $v(t)$ a tensão da fonte e $i(t)$ a corrente fluindo no circuito, para:

$$v(t) = V_{\max} \text{ sen } \omega t \quad (1)$$

vem:

a - Nos períodos de bloqueio dos tiristores:

$$i_1(t) = i_2(t) = 0 \quad (2)$$

b - Nos períodos de condução dos tiristores:

$$v(t) = V_{\max} \text{ sen } \omega t = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

onde:

$$R = R_e + R_c$$

e

$$L = L_e + L_c$$

Resolvendo (3), pela aplicação da Transformada de Laplace, resulta:

a - Para o pulso positivo de corrente, isto é período de condução do tiristor 1:

$$i_1(t) = I_{\max} \{ \text{sen}(\omega t - 0 + \alpha) + e^{-\beta t} \text{sen}(0 - \alpha) \} \quad (4)$$

b - Para o pulso negativo de corrente, ou seja, no período de condução do tiristor 2:

$$i_2(t) = I_{\max} \{ \text{sen}(\omega t - \theta + \delta) + e^{-\beta t} \text{sen}(\theta + \delta) \} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{R}{L} \quad \theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\omega}{\beta}\right)$$

onde:

$$\delta = \alpha + \pi, I_{\max} = \frac{V_{\max}M}{L} \text{ e } M = \frac{1}{\sqrt{\beta^2 + \omega^2}}$$

De modo a generalizar as equações (4) e (5), é necessário levar em conta o efeito do “desequilíbrio no ângulo disparo”. Este é um problema que surge devido a oscilações amortecidas ou imprecisões de medições por parte do sistema de controle. Ele resulta em um atraso no disparo de um dos tiristores em relação ao outro, quando do funcionamento normal, originando uma produção adicional de harmônicos. A FIGURA 1.3 leva em consideração este atraso. Pode-se notar a menor amplitude que atinge o pulso negativo de corrente devido ao atraso no disparo, de $d\alpha$, em relação ao pulso positivo.

O efeito deste “desequilíbrio no ângulo de disparo” pode ser introduzido em (4) e (5), como indicado na FIGURA 1.3, apenas fazendo-se, agora:

$$\delta = \alpha + \pi + d\alpha \quad (6)$$

2 - OBTENÇÃO DOS COMPONENTES HARMÔNICOS

Os componentes harmônicos da corrente no reator são calculados pelo desenvolvimento em série de Fourier das expressões (4) e (5). Para isto, deve-se levar em conta:

1 - As referências utilizadas na dedução de (4) e (5), as quais como podem ser observadas nas FIGURAS 1.2 e 1.3, são diferentes. Isto exige um “deslocamento” destas referências, e das respectivas equações, para uma referência comum que, já se estabeleceu no início, será um dos zeros de tensão e que por simplicidade, será adotado como um zero crescente, isto é, onde a tensão passa de negativa para positiva. A FIGURA 2.1 ilustra esta condição. As expressões (4) e (5) passam a ser:

$$i_1(t) = I_{\max} \left\{ \text{sen}(\omega t - \theta) - e^{-\beta(t - \frac{\alpha}{\omega})} \text{sen}(\alpha - \theta) \right\} \quad (7)$$

$$i_2(t) = I_{\max} \left\{ \text{sen}(\omega t - \theta) - e^{-\beta(t - \frac{\alpha + d\alpha + \pi}{\omega})} \text{sen}(\alpha + d\alpha + \pi - \theta) \right\} \quad (8)$$

2 - O período de integração total será igual a 2π , sendo que o pulso positivo existirá, conforme a FIGURA 2.1, de T_1 e T_2 , em quanto o pulso negativo existirá de T_3 e T_4 . Estes serão os limites de integração, os quais são dados por:

$$T_1 = \alpha/\omega \quad (9)$$

$$T_3 = (\pi + \alpha + d\alpha)/\omega \quad (10)$$

Não havendo resistências no circuito, da FIGURA 2.1 tira-se que:

$$T_2 = (2\pi - \alpha)/\omega \quad (11)$$

e

$$T_4 = T_2 + \frac{\pi - d\alpha}{\omega} = (3\pi - \alpha - d\alpha)/\omega \quad (12)$$

Havendo resistência no circuito, devido ao amortecimento, (11) e (12) tornam-se inválidas. Para determinar T_2 e T_4 , neste caso, deve-se observar que para $t = T_2$ a corrente é nula. Substituindo esta condição em (7), vem:

$$\text{sen}(\omega T_2 - \theta) - e^{-\beta(T_2 - \frac{\alpha}{\omega})} \text{sen}(\alpha - \theta) = 0 \quad (13)$$

que dá o valor de T_2 e, por ser uma equação transcendental, exige um processo iterativo para sua solução.

Determinado T_2 através de (13), T_4 pode ser obtido facilmente por:

$$T_4 = T_2 + \frac{\pi - d\alpha}{\omega} \quad (14)$$

3 - Os valores eficazes das correntes harmônicas em termos dos coeficientes da série de Fourier, e em valor porcentual com relação à corrente nominal do reator, são dados por:

$$I_n(\%) = \frac{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}{\sqrt{2}I_1} \times 100 \quad (15)$$

onde $n = 1, 2, \dots$ é a ordem do harmônico, e I_1 é o valor eficaz da componente fundamental, ou da corrente nominal do reator.

Para a componente contínua, vem que:

$$I_0 = \frac{a_0}{2}$$

ou

$$I_0(\%) = \frac{a_0}{2I_1} \times 100 \quad (16)$$

Os desenvolvimentos para os cálculos dos coeficientes da série trigonométrica de Fourier a partir de (7) e (8) serão aqui omitidos. Os resultados são dados pelas seguintes expressões:

$$a_0 = \frac{\omega I_{\max}}{\pi} \left\{ -\frac{\cos(\omega t - \theta)}{\omega} \right|_{T_1}^{T_2} + \frac{e^{\frac{\beta\alpha}{\omega}} \text{sen}(\alpha - \theta)}{\beta} e^{-\beta t} \left|_{T_1}^{T_2} - \frac{\cos(\omega t - \theta)}{\omega} \right|_{T_3}^{T_4} - \frac{e^{\frac{\beta(\alpha + d\alpha + \pi)}{\omega}} \text{sen}(\alpha + d\alpha - \theta)}{\beta} e^{-\beta t} \left|_{T_3}^{T_4} \right\} \quad (17)$$

$$a_1 = \frac{\omega I_{\max}}{\pi} \left\{ \left(\frac{-\cos(2\omega t - \theta)}{4\omega} - \frac{t \operatorname{sen} \theta}{2} \right) \Big|_{T_1}^{T_2} + \frac{(-\cos(2\omega t - \theta)}{4\omega} - \frac{t \operatorname{sen} \theta}{2} \right) \Big|_{T_3}^{T_4} + \frac{1}{\beta^2 + \omega^2} \operatorname{sen}(\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\alpha}{\omega})} \right. \\ \left. (\beta \cos \omega t - \omega \operatorname{sen} \omega t) \Big|_{T_1}^{T_2} - \operatorname{sen}(\alpha + d\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\delta}{\omega})} (\beta \cos \omega t - \omega \operatorname{sen} \omega t) \Big|_{T_3}^{T_4} \right\} \quad (18)$$

$$a_n = \frac{\omega I_{\max}}{\pi} \left\{ \left[-\frac{\cos((n+1)\omega t - \theta)}{2(n+1)} + \frac{\cos((n-1)\omega t + \theta)}{2(n-1)\omega} \right] \Big|_{T_1}^{T_2} + \left[-\frac{\cos((n+1)\omega t - \theta)}{2(n+1)\omega} + \frac{\cos((n-1)\omega t + \theta)}{2(n-1)\omega} \right] \Big|_{T_3}^{T_4} + \right. \\ \left. + \frac{\operatorname{sen}(\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\alpha}{\omega})}}{\beta^2 + n^2 \omega^2} (\beta \cos n\omega t - n\omega \operatorname{sen} \omega t) \Big|_{T_1}^{T_2} + \frac{\operatorname{sen}(\alpha + d\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\delta}{\omega})}}{\beta^2 + n^2 \omega^2} (-\beta \cos n\omega t + n\omega t) \Big|_{T_3}^{T_4} \right\} \quad (19)$$

$$b_1 = \frac{\omega I_{\max}}{\pi} \left\{ \frac{t \cos \theta}{2} \Big|_{T_1}^{T_2} - \frac{\operatorname{sen}(2\omega t - \theta)}{4\omega} \Big|_{T_1}^{T_2} + \frac{\operatorname{sen}(\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\alpha}{\omega})}}{\beta^2 + \omega^2} (\beta \operatorname{sen} \omega t + \omega \cos \omega t) \Big|_{T_1}^{T_2} + \frac{t \cos \theta}{2} \Big|_{T_3}^{T_4} - \right. \\ \left. - \frac{\operatorname{sen}(\alpha + d\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\delta}{\omega})}}{\beta^2 + \omega^2} (\beta \operatorname{sen} \omega t + \omega \cos \omega t) \Big|_{T_3}^{T_4} \right\} \quad (20)$$

$$b_n = \frac{\omega I_{\max}}{\pi} \left\{ \left[\frac{\operatorname{sen}((n-1)\omega t + \theta)}{2(n-1)\omega} - \frac{\operatorname{sen}((n+1)\omega t - \theta)}{2(n+1)\omega} \right] \Big|_{T_1}^{T_2} + \left[\frac{\operatorname{sen}((n-1)\omega t + \theta)}{2(n-1)\omega} - \frac{\operatorname{sen}((n+1)\omega t - \theta)}{2(n+1)\omega} \right] \Big|_{T_3}^{T_4} + \right. \\ \left. + \frac{\operatorname{sen}(\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\alpha}{\omega})}}{\beta^2 + n^2 \omega^2} (\beta \operatorname{sen} n\omega t + n\omega \cos n\omega t) \Big|_{T_1}^{T_2} - \frac{\operatorname{sen}(\alpha + d\alpha - \theta) e^{-\beta(t-\frac{\delta}{\omega})}}{\beta^2 + n^2 \omega^2} (\beta \operatorname{sen} n\omega t + n\omega \cos n\omega t) \Big|_{T_3}^{T_4} \right\} \quad (21)$$

Para $R = 0$, obtenve-se:

$$a_0 = \frac{\omega I_{\max}}{\pi} \left\{ -\frac{\operatorname{sen} \omega t}{\omega} \Big|_{T_1}^{T_2} + t \cos \alpha \Big|_{T_1}^{T_2} - \frac{\operatorname{sen}(\omega t - d\alpha)}{\omega} \Big|_{T_3}^{T_4} - t \cos(\alpha + d\alpha) \Big|_{T_3}^{T_4} \right\} \quad (22)$$

$$b_1 = 0 \quad (23)$$

$$b_n = 0 \quad (24)$$

Para $d\alpha = 0$, obtenve-se:

$$a_0 = 0 \quad (25)$$

3 - CONSIDERAÇÃO DA “FUNÇÃO CONTROLE”

Nos compensadores estáticos a tiristores, o sistema de controle é o responsável pela determinação do ângulo necessário para o disparo e pelo comando para que isto ocorra no instante preciso. O funcionamento deste sistema de controle baseia-se na medição de alguma variável que defina o “estado” atual do sistema, e sua comparação com valores de referência com a finalidade de determinar o ângulo de disparo necessário. De acordo com o fabricante, a grandeza medida para a verificação do estado do sistema varia. Ela pode ser uma corrente de linha, a potência reativa fluindo na linha, tensões fase-fase ou fase-neutro, uma combinação de duas destas grandezas, etc. aqui será adotada a tensão como grandeza controlada, já que ela permite uma maior percepção a uma análise teórica como esta.

A determinação do ângulo de disparo é feita com base numa equação aqui designada “função do controle” que relaciona a corrente fundamental no reator com as grandezas medidas e de referência. De acordo com o circuito utilizado pelo sistema de controle, estas “funções de controle” podem ser diferentes. Uma forma utilizada e que aqui será adotada é a seguinte:

$$2\pi - 2\alpha + \text{sen}2\alpha = \pi \left(\frac{V_{\text{ap}} - V_s}{V_{\text{max}} - V_s} \right) \quad (26)$$

que pode ser encontrada nas referências (1) e (2). Nesta equação define-se:

V_{ap} - tensão eficaz medida no barramento

V_s - tensão eficaz desejada no barramento. É a tensão de referência.

V_{max} - tensão máxima que pode se verificar no barramento. A condição crítica significa o reator e a carga fora de serviço e apenas o banco de capacitores fixo conectado.

Com (26), é possível determinar, por um processo iterativo, α e, conseqüentemente, os limites de integração das equações (17) a (22).

4 - RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os gráficos das FIGURAS 4.1 a 4.4 mostram a variação das correntes fundamental, de 2º, 3º e 5º harmônicos com a tensão aplicada ao reator em um sistema real típicos onde as resistências não foram obtidos através de um programa em computador digital na qual foram implementadas as expressões do desenvolvimento em série de Fourier aqui apresentadas.

Comparações entre muitos casos testados, revelam que o efeito das resistências para sistemas reais é praticamente desprezíveis. Entretanto, em sistemas onde a relação R/X seja excessiva, o efeito do amortecimento se torna acentuado. O amortecimento dos pulsos de corrente dá origem aos harmônicos pares que, portanto, crescerão com o aumento da relação R/X. Caso não haja resistências presentes no circuito, apenas harmônicos ímpares são gerados.

Na FIGURA 4.1 pode-se ver a relação linear que pode ser obtida entre a magnitude da corrente fundamental e a tensão aplicada com a “função do controle” adotada. Isto é muito importante para o bom funcionamento do sistema de controle.

Outros testes foram feitos com o objetivo de analisar o efeito do desequilíbrio no ângulo de disparo dos tiristores. Por estes testes, constatou-se um crescimento de todos os componentes harmônicos com o aumento do desequilíbrio no ângulo de disparo. Viu-se ainda que este desequilíbrio não dá origem, por si só, a harmônicos pares, pois seu efeito não altera a característica da função par da corrente do reator, na ausência de resistências. O problema mais grave constatado neste caso, foi o surgimento da componente de ordem zero, crescendo linearmente com o desequilíbrio no ângulo de disparo, numa relação de até 1% de corrente contínua para cada grau de desequilíbrio. Este problema é de grande importância pois, como se sabe, componentes de correntes contínua podem causar efeitos prejudiciais nos isolamentos ou mesmo levar à saturação de transformadores e máquinas rotativas. Por isso, os sistemas de controle devem ser dotados de dispositivos capazes de detectar e eliminar os desequilíbrios nos ângulos de disparo.

5 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] - PINHEIRO, Ricardo F. Equipamentos Estáticos para a compensação de reativos e desequilíbrios em Sistemas Elétricos. EFEI, jun. 1980. Tese de Mestrado.
- [2] - CHARLES, P.; BOIDIN, M.; DROUIN, G. Perturbations des Réseaux Industriels et de Distribution. Revue Generale de Electricite, Tome 88, n. 01, Jan. 1979, p. 49 - 73.
- [3] - WALSHE, K.A. Thyristor Controlled Shunt Reactor Compensation of Asymmetrically Loaded Power Systems. UMIST, Out. 1976. Tese de Doutorado.

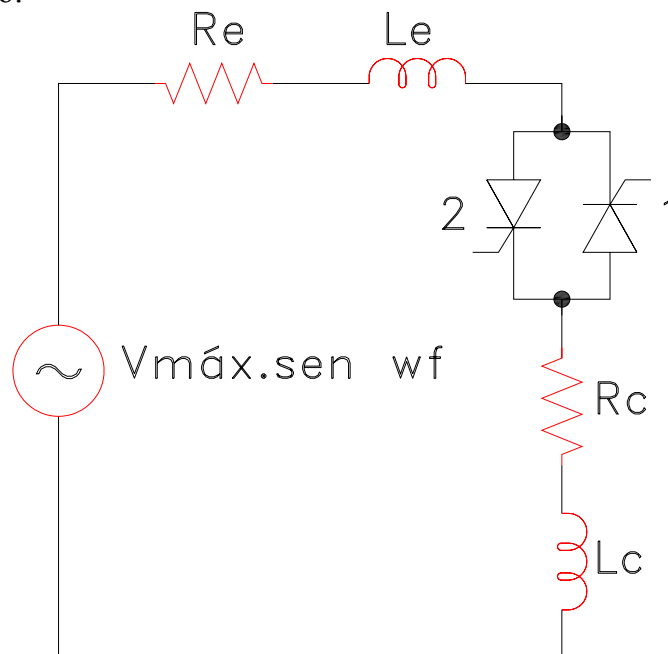


FIGURA 1.1 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO CONSIDERANDO A IMPEDÂNCIA DO SISTEMA E A RESISTÊNCIA DO REATOR.

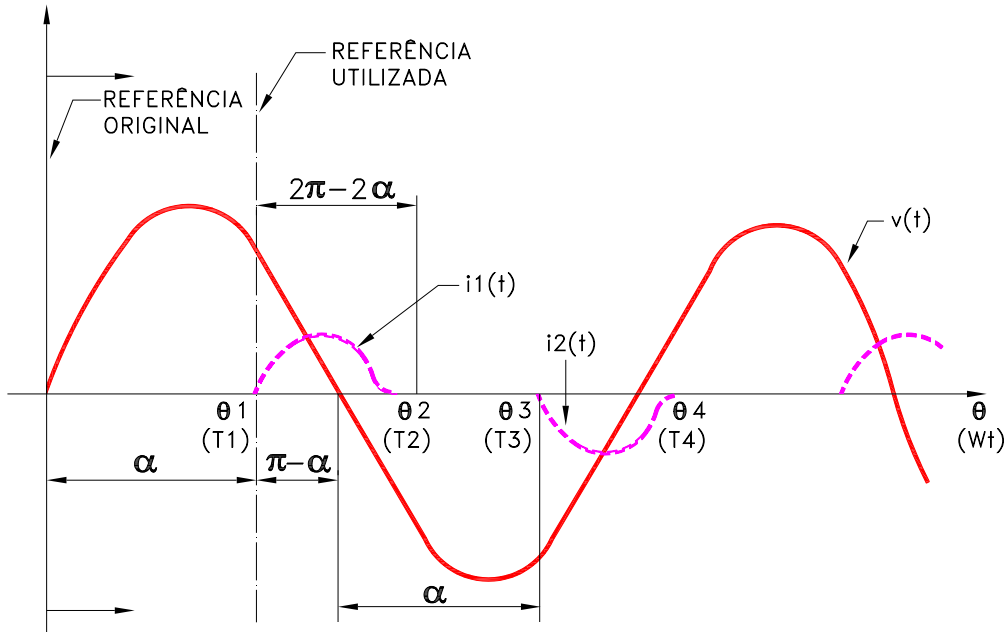


FIGURA 1.2 - REPRESENTAÇÃO DO DESLOCAMENTO DA REFERÊNCIA, PARA O CÁLCULO DO PULSO POSITIVO DA CORRENTE.

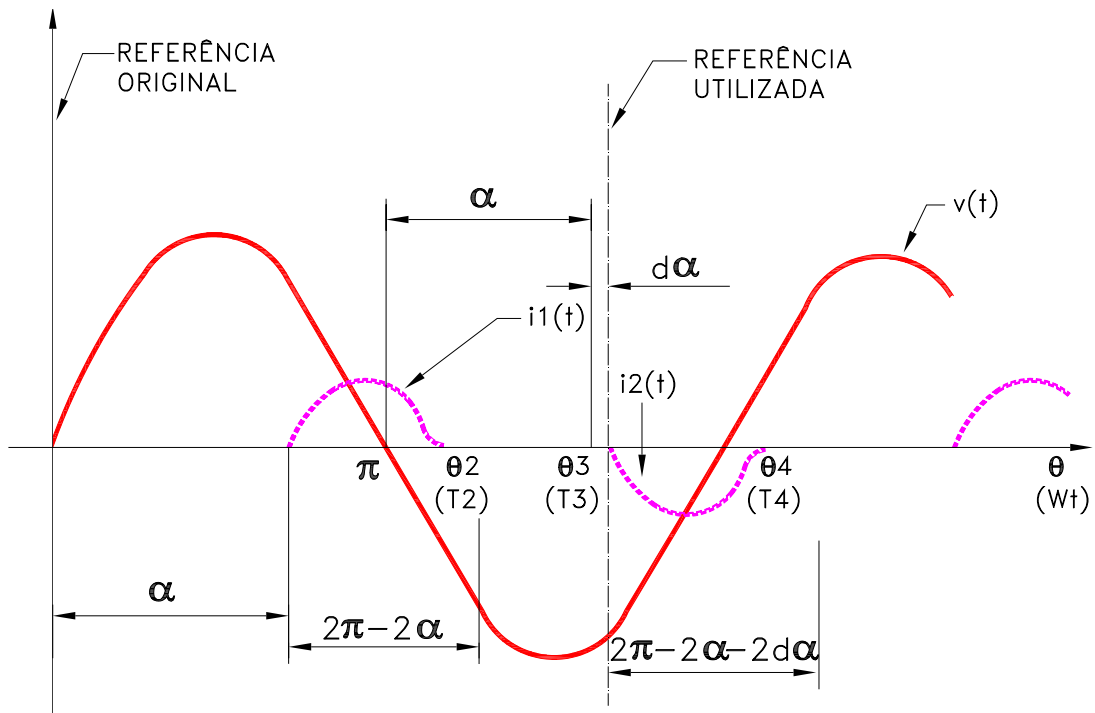


FIGURA 1.3 - REPRESENTAÇÃO DO DESLOCAMENTO DA REFERÊNCIA, PARA O CÁLCULO DO PULSO NEGATIVO DE CORRENTE CONSIDERANDO-SE UM DESEQUILÍBRIO $d\alpha$ NO ÂNGULO DE DISPARO.

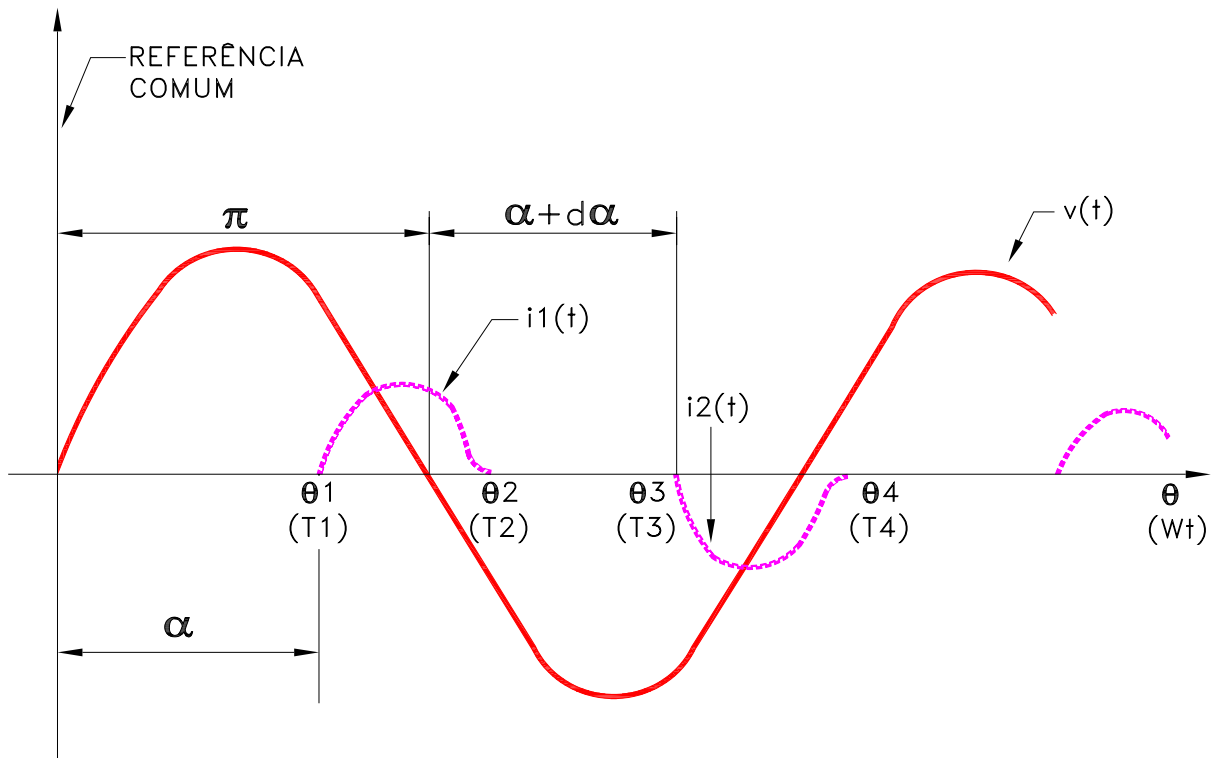


FIGURA 2.1 - REPRESENTAÇÃO DOS PULSOS DE CORRENTE NOVAMENTE SOB UMA REFERÊNCIA COMUM.

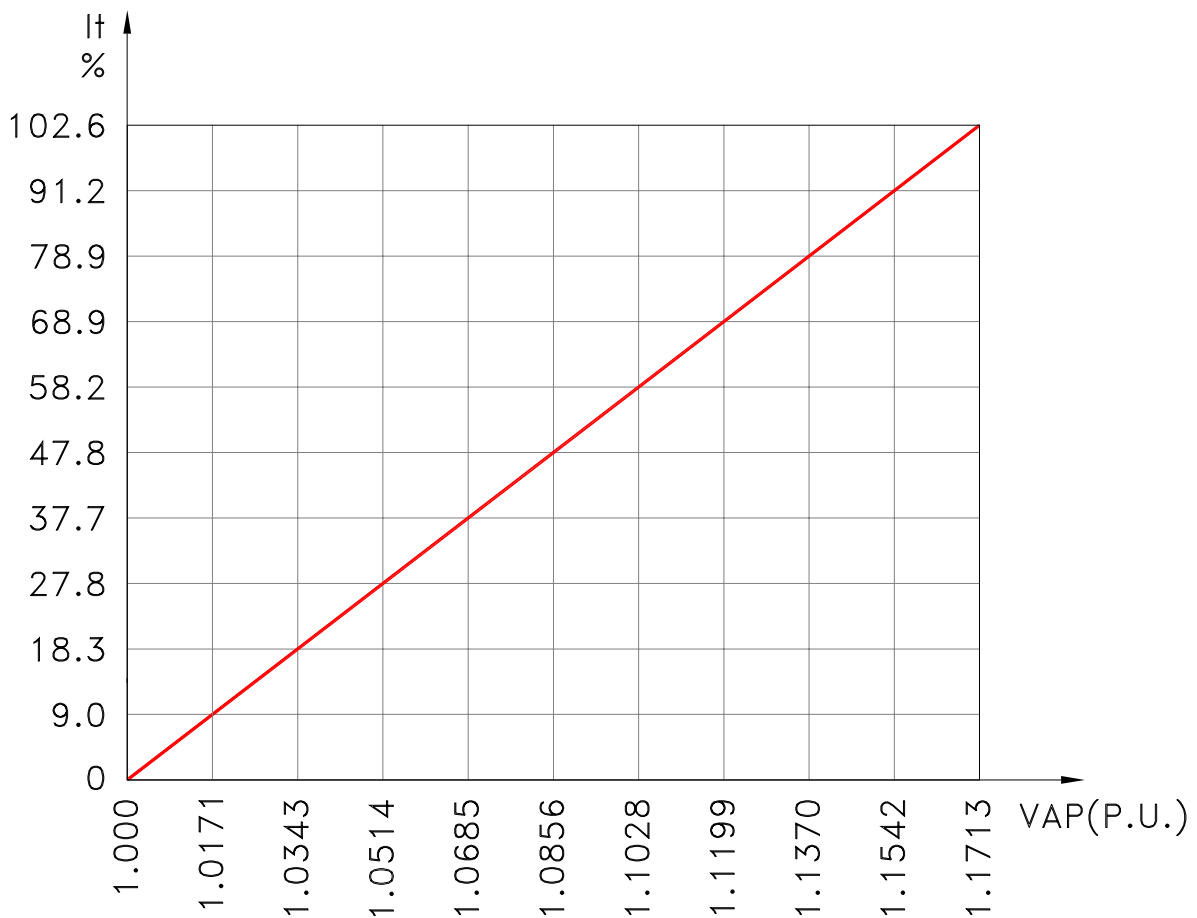


FIGURA 4.1 - VARIAÇÃO DA CORRENTE FUNDAMENTAL EM % DA NOMINAL, COM A TENSÃO APLICADA ($R \neq 0$).

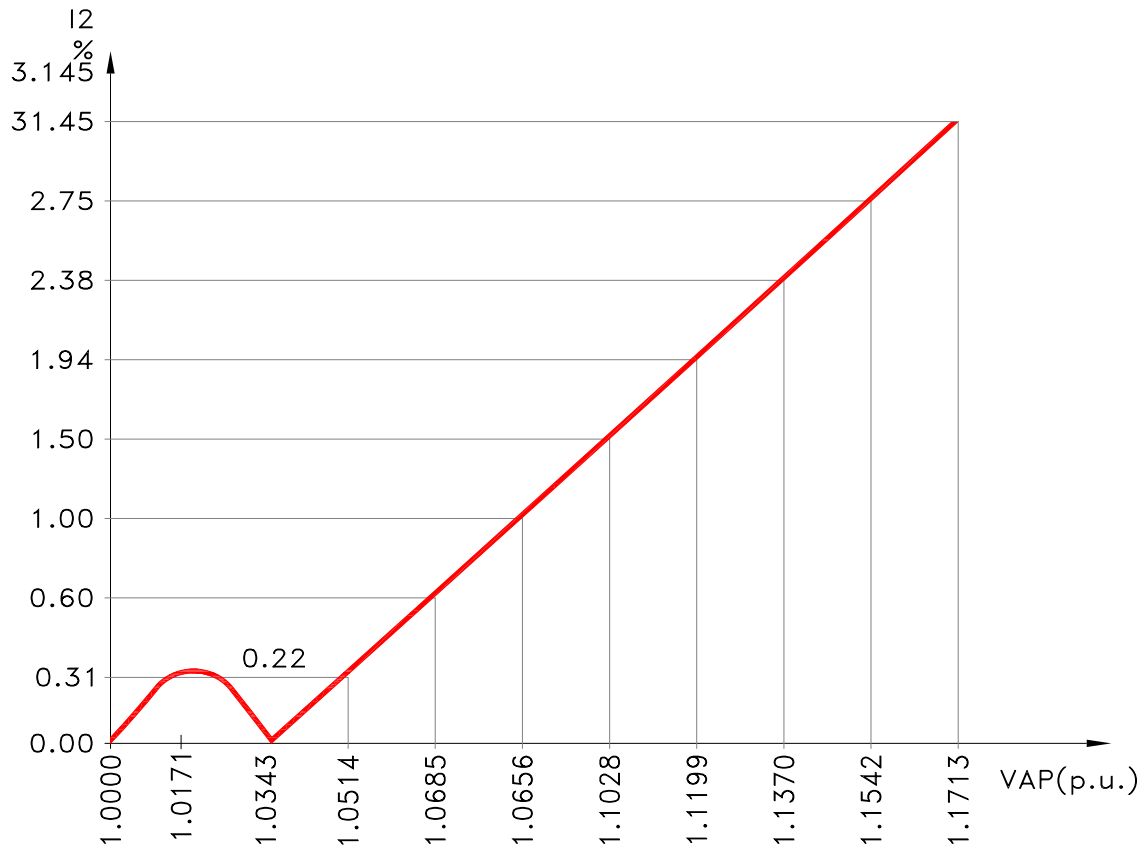


FIGURA 4.2 - CORRENTE DE 2º HARMÔNICO X TENSÃO APLICADA ($R \neq 0$).

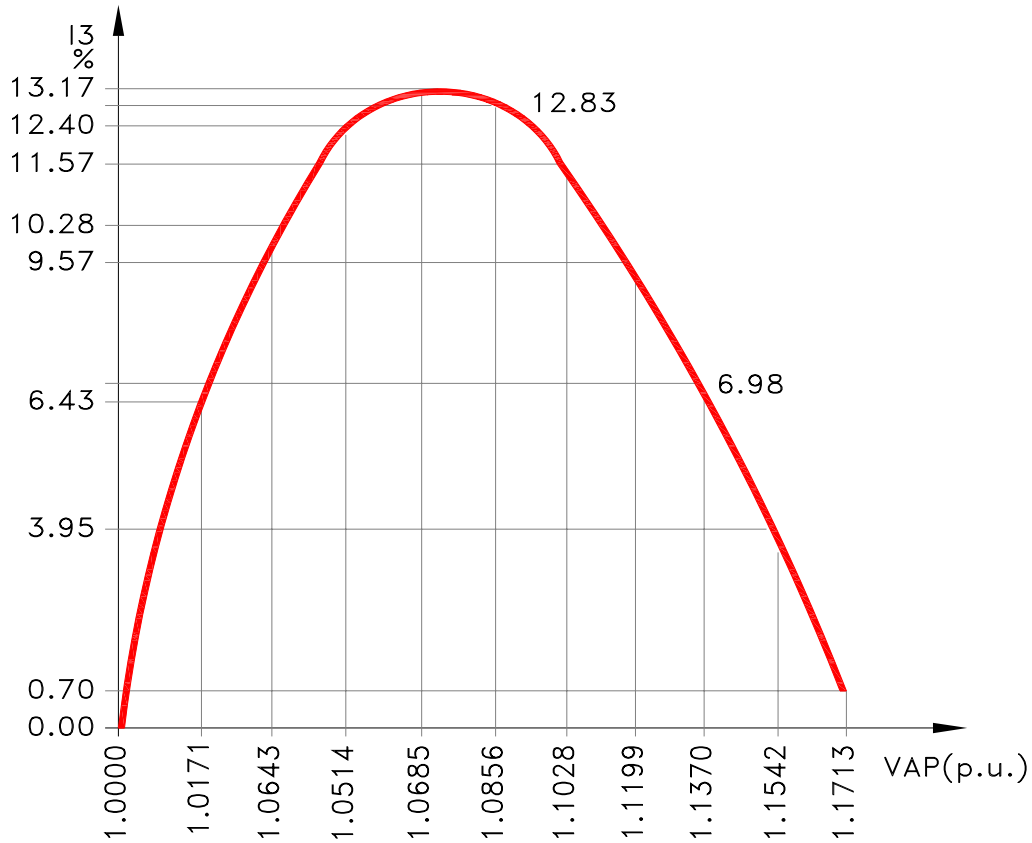


FIGURA 4.3 - CORRENTE DE 3º HARMÔNICO X TENSÃO APLICADA ($R \neq 0$).

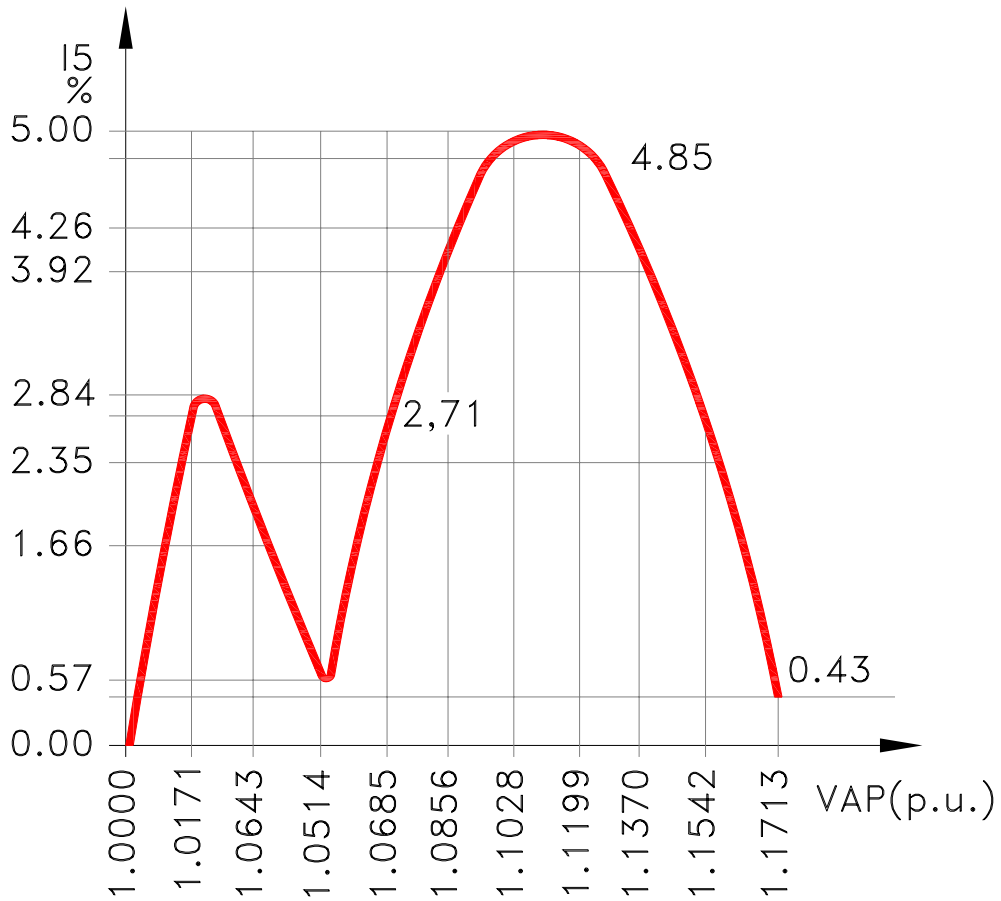


FIGURA 4.4 - CORRENTE DE 5º HARMÔNICO X TENSÃO APLICADA (R ≠ 0).