ANALIZA ARMONICELOR ÎN SISTEMELE TRIFAZATE DEZECHILIBRATE

ing. Eugen COCA
SD Suceava, PRAM
ecoca@email.com

Rezumat

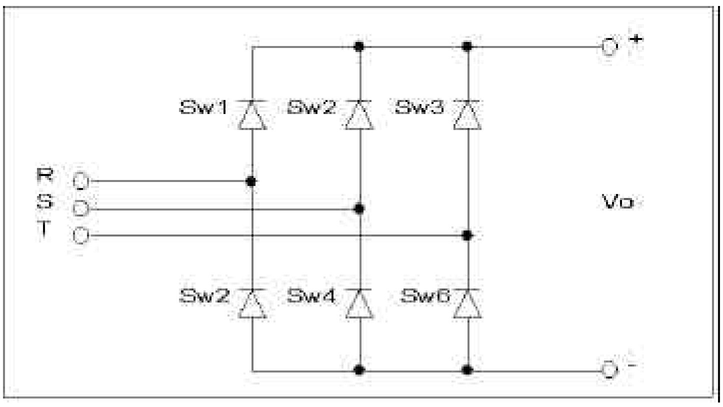
Articolul prezinta un mod de analiza a unui convertor static AC/DC functionând într-un sistem trifazat. Se demonstreaza ca în cazul în care sistemul este dezechilibrat, tensiunea continua debitata de convertor contine pe lânga armonicele "clasice", adica 6, 12, 18 si armonice necaracteristice 2, 4, 8, 10, etc. ce au un efect negativ asupra consumatorilor de la iesire dar si asupra celorlalti consumatori conectati la retea în acel moment.

1. Introducere

Progresele tehnologice înregistrate în ultimii ani în domeniul conversiei energiei s-au bazat într-o mare masura pe utilizarea unor convertoare realizate cu dispozitive semiconductoare active. Însa, în cazul transformarii curentului alternativ în curent continuu se folosesc înca într-o foarte mare masura convertoare statice cu dispozitive pasive (binecunoscutele punti redresoare trifazate). Vom analiza functionarea unei asemenea punti redresoare în cazul în care sistemul trifazat este dezechilibrat.

2. Functia de transfer a convertorului

Consideram cazul clasic al unei punti redresoare trifazate realizata cu diode semiconductoare:



Functia de transfer sistemului poate fi descrisa matematic ca raport între tensiunea de iesire si tensiunea de la intrare (reprezentate vectorial):

$$V_0 = T.\bar{v} \tag{1}$$

$$T = [S_{W1}, S_{W2}, S_{W3}] \text{ unde: } \begin{cases} S_{W1} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k . \sin k(\omega t + \alpha) \\ S_{W2} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k . \sin k(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ S_{W3} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k . \sin k(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \end{cases} \tag{2}$$

Tensiunea de intrare poate fi scrisa vectorial sub forma: $\bar{v} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V.\sin \omega t \\ V.\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V.\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$ (3)

3. <u>Analiza în regim nesimetric</u>

Considerând cazul general, în regim stationar, orice tensiune de intrare se poate descompune [1] în doua componente simetrice, una pozitiva si una negativa, astfel:

$$\bar{v} = \bar{v}_p + \bar{v}_n \tag{4}$$

unde:

$$\bar{v}_p = \begin{bmatrix} V_p . \sin \omega t \\ V_p . \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_p . \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \text{ si } \bar{v}_n = \begin{bmatrix} V_n . \sin(\omega t + \beta) \\ V_n . \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \beta) \\ V_n . \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \beta) \end{bmatrix} \tag{5}$$

În mod similar, si functia de transfer a convertorului poate fi descompusa în doua componente:

$$T = T_p + T_n \tag{6}$$

unde:

$$T_p = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{\infty} A_{kp}.\sin k(\omega t + \alpha) \\ \sum_{k=1}^{\infty} A_{kp}.\sin k(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ \sum_{k=1}^{\infty} A_{kp}.\sin k(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \end{bmatrix}^T \text{ si } T_n = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{\infty} A_{kn}.\sin k(\omega t + \alpha) \\ \sum_{k=1}^{\infty} A_{kn}.\sin k(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \lambda) \\ \sum_{k=1}^{\infty} A_{kn}.\sin k(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \lambda) \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

În aceste conditii, tensiunea de iesire are forma:

$$V_0 = T_p.\bar{v}_p + T_p.\bar{v}_n + T_n.\bar{v}_p + T_n.\bar{v}_n \quad (8)$$

Aceasta ecuatie reprezinta tensiunea de la iesirea convertorului ca suma dintre produsele dintre functiile de transfer pozitiva si negativa si tensiunile de intrare de secventa pozitiva si negativa.

Presupunând ca functiile de transfer ale convertorului nu contin decât armonice impare care nu sunt multiplu de 3, se poate scrie:

$$\begin{aligned} T_p.\bar{v}_p = \frac{3}{2}.[\, & A_{1p}.V_p.\cos\alpha - A_{5p}.V_p.\cos(6\omega t + 5\alpha) + A_{7p}.V_p.\cos(6\omega t + 7\alpha) \\ & - A_{11p}.V_p.\cos(12\omega t + 11\alpha) + A_{13p}.V_p.\cos(12\omega t + 13\alpha) + ...] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T_n.\bar{v}_n = \frac{3}{2}.[\, & A_{1n}.V_n.\cos(\lambda - \beta) - A_{5n}.V_n.\cos(6\omega t + 5\lambda + \beta) + A_{7n}.V_n.\cos(6\omega t + 7\lambda - \beta) \\ & - A_{11n}.V_n.\cos(12\omega t + 11\lambda + \beta) + A_{13n}.V_n.\cos(12\omega t + 13\lambda - \beta) + ...] \end{aligned} \quad (10)$$

Se observa în spectrul acestor produse componente care sunt multiplii pari ai frecventei tensiunii de intrare (multiplii de ordin divizibil cu 6) 6, 12, 18, etc. fapt previzibil.

Într-un mod similar se pot scrie celelalte doua produse din spectrul tensiunii de iesire:

$$\begin{aligned} T_p.\bar{v}_n = \frac{3}{2}.[\, & -A_{1p}.V_n.\cos(2\omega t + \alpha + \beta) + A_{5p}.V_n.\cos(4\omega t + 5\alpha - \beta) \\ & - A_{7p}.V_n.\cos(8\omega t + 7\alpha + \beta) + A_{11p}.V_n.\cos(8\omega t + 7\alpha - \beta) - ....] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_n.\bar{v}_p = \frac{3}{2}.[\, & -A_{1n}.V_p.\cos(2\omega t + \lambda) + A_{5p}.V_n.\cos(4\omega t + 5\lambda) \\ & - A_{7p}.V_n.\cos(8\omega t + 7\lambda) + A_{11p}.V_n.\cos(10\omega t + 11\lambda) + ...] \end{aligned} \quad (12)$$

Se remarca prezenta în acesti termeni a armonicelor pare ale tensiunii de intrare 2, 4, 8, 10, etc., fapt mai putin evident în cazul unei analize sumare.

În cazul unui sistem echilibrat amplitudinile armonicelor pare sunt egale cu zero (fapt confirmat si prin masuratori practice).

Pentru exemplificare, consideram doua situatii practice: una în care sistemul este echilibrat si una în care sistemul este dezechilibrat.

4. Exemplu de calcul

Sa consideram cazul unui sistem **echilibrat** în care $\alpha = -\pi / 6$.

În acest caz, functia de transfer a comutatorului Sw1 este:

$$S_{W1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}\left[sin(\omega t + \alpha) - \frac{1}{5} sin\, 5(\omega t + \alpha) - \frac{1}{7} sin\, 7(\omega t + \alpha) - ... \right] \tag{13}$$

Tensiunea de la iesirea convertorului poate fi scrisa sub forma:

$$V_0 = 1.43 + 0.095 \cos 6(\omega t + \alpha) - 0.023 \cos 12(\omega t + \alpha) + ... \tag{14}$$

Se observa prezenta doar a armonicelor multiplu de 6, fapt previzibil.

Sa consideram acum un sistem **dezechilibrat**, în care tensiunea de la intrarea convertorului are forma:

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} sin\, \omega t \\ 0.85\, sin(\omega t - 0.7\pi) \\ 0.85\, sin(\omega t + 0.7\pi) \end{bmatrix} \tag{15}$$

Descompunând aceasta tensiune în doua componente, de secventa directa si inversa, si efectuând calculele ca mai sus, obtinem reprezentarea Fourier a tensiunii de iesire:

$$V_0 = 1.29 - 0.165 \cos(2\omega t + \alpha) - 0.033 \cos(4\omega t + 5\alpha) + 0.266 \cos(6\omega t + 8.5\alpha) + ... \tag{16}$$

Se observa prezenta, pe lânga armonicele multiplu de 6 si a armonicelor pare multiplu de 2, fapt care nu putea fi prevazut în cazul în care analiza s-ar fi facut numai pentru cazul unui sistem trifazat echilibrat.

5. Concluzii

Prezentul articol demonstreaza ca trebuie acordata o mare atentie calitatii energiei electrice furnizate consumatorilor atât prin prisma neplacerilor cauzate de o energie cu parametri de calitate scazuti cât si datorita problemelor suplimentare cauzate de consumatori fara voia acestora (armonicele prezente în tensiunea de la iesirea convertorului se transmit si în sistem prin intermediul capacitatilor de cuplaj parazite si prin radiatie.

6. Bibliografie

[1] – W. D. Stevenson, "Power System Analysis", New York, Mc. Graw-Hill, 1955
[2] – IEEE Working Group on Power System Harmonics, "Power system harmonics - An Overview", IEEE Trans. Power Appl. Syst., Vol PAS-102, no.8, 1983
[3] – Y. Jiang, A. Ekstrom, "General Analysis of Harmonic Transfer through Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.12, no.2, March 1997