

# Desequilíbrio dos Terceiros Harmônicos de Tensão.

Luiz C. de A. Fonseca e Fernando R. Alves

**Resumo-** Este informe técnico analisa os harmônicos não característicos triplos gerados por retificadores e compensadores estáticos e apresenta uma proposta de explicação para os desequilíbrios encontrados nos ensaios de terceiro harmônico de tensão realizados no sistema brasileiro.

**Palavras Chave** – Harmônicos, Qualidade da Energia.

## I. INTRODUÇÃO

Ensaios de harmônicos de tensão na região sudeste constataram que o comportamento dos harmônicos de 3ª ordem estava diferente do comportamento das outras ordens harmônicas. Enquanto as outras ordens apresentavam equilíbrio nos valores das três fases, o terceiro harmônico estava sensivelmente desequilibrado. Na época da apresentação destas medições pelo ONS, as explicações ainda não estavam conclusivas. Este artigo visa apresentar algumas considerações sobre a geração dos harmônicos triplos e propor explicação sobre estas diferenças. Considerando o uso do modelo de fontes independentes de harmônicos, sabe-se que as tensões harmônicas são o resultado do produto das correntes injetadas em uma determinada barra pela impedância harmônica vista desta mesma barra. O desequilíbrio das tensões harmônicas, portanto, pode dever-se a correntes geradas com desequilíbrio, ou impedâncias diferentes nas diversas fases.

## II. IMPEDÂNCIA DA REDE

A impedância vista de uma determinada barra é equilibrada para correntes trifásicas 60Hz defasadas de 120° entre si, pois as transposições nas linhas longas garantem este equilíbrio. O mesmo não se pode dizer em relação às correntes harmônicas que tenham um defasamento de 120 graus entre si e menos ainda para correntes homopolares, ou seja, as triplas [1]. Sabe-se que para correntes homopolares, seqüência zero, a impedância é diferente do que para correntes trifásicas equilibradas. Será feito, a princípio, a análise dos harmônicos de corrente.

## III. CORRENTES TRIPLAS

Uma das definições de desequilíbrio num sistema trifásico é dada pela relação entre a seqüência negativa e a componente de seqüência positiva. Outra definição seria resultante da relação entre a seqüência zero e a seqüência positiva.

Analisaremos inicialmente a possível geração de correntes harmônicas de terceira ordem, sua causa e se são desequilibradas.

A hipótese é que estes harmônicos de corrente de terceira ordem devem estar sendo gerados ou por uma grande fonte ou por somatório de pequenas fontes em todo o sistema.

A principal fonte de harmônicos na rede elétrica são os retificadores. A maioria dos retificadores de porte é os de seis pulsos, ou seja, as pontes hexafásicas, isolados ou em arranjos de 12 pulsos. Nestas fontes os terceiros harmônicos de corrente são não características, ou seja, só são geradas devido a desequilíbrios. A série a seguir apresenta a expansão em série de Fourier de uma onda de trens de pulsos de largura  $w$ , da Fig. 1[2].

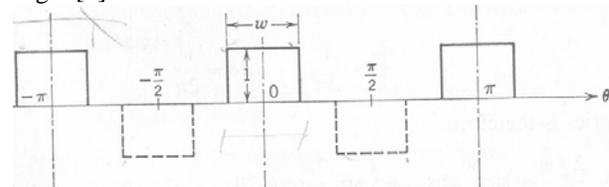


Fig. 1. Trem de pulsos de uma corrente de um retificador hexafásico.

$$F = F_1(\theta) + F_2(\theta) = \frac{2}{\pi} \left( \text{sen} \frac{\omega}{2} \cos \theta + \frac{1}{3} \text{sen} \frac{3\omega}{2} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \text{sen} \frac{5\omega}{2} \cos 5\theta \dots \right)$$

Caso este trem de pulsos tenha sido gerado por uma ponte hexafásica, a largura  $w$  seria:  $w = 2q\pi/h$  o que anularia os harmônicos triplos, na verdade os harmônicos triplos são eliminados quando uma função têm simetria de quarto de onda.

O problema é que os desequilíbrios de tensão, tolerâncias no ângulo de disparo - caso seja ponte controlada - tolerâncias nas diversas fases do transformador que alimenta o retificador, causa desequilíbrio na largura ou na forma de  $w$ , e conseqüentemente o surgimento de 3º harmônicos de corrente. Os harmônicos triplos são gerados teoricamente em fase, ver Fig. 2. Quando há desequilíbrios eles são gerados com desequilíbrio. Como, normalmente, os desequilíbrios são pequenos, estas componentes têm pequena defasagem entre si.

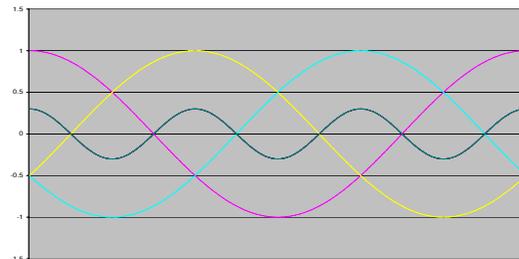


Fig. 2. Terceiros Harmônicos.

IV. COMPENSADORES ESTÁTICOS

Outra fonte de harmônicos são os compensadores estáticos (CE). O arranjo do reator controlado a tiristores um dos componentes do CE pode ser visto na Fig. 3.

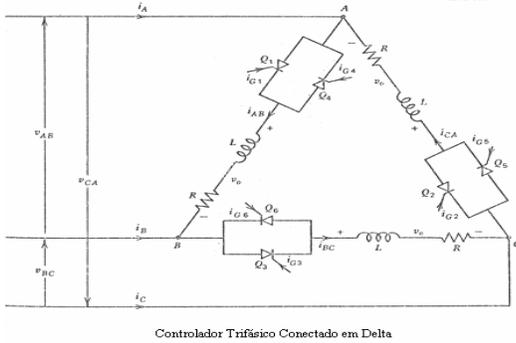
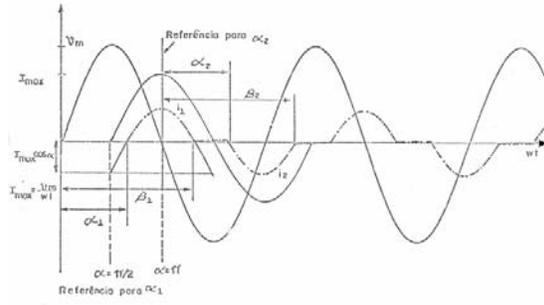


Fig. 3. Reatores Controlados de um Compensador Estático

A forma de onda da corrente numa fase deste reator está mostrada na Fig. 4.



Tensão fase-fase e corrente de ruído no RCT, para um ângulo de disparo  $\alpha$ .

Fig. 4. Corrente numa fase de um reator de um Compensador Estático.

A listagem a seguir mostra harmônicos de terceira ordem gerados por compensadores estáticos, outra grande fonte de harmônicos. Embora a forma de onda seja diferente das dos retificadores, não têm simetria de quarto de onda, pode-se ter uma ordem de grandeza da defasagem destes harmônicos gerados quando de desequilíbrios. No caso estes harmônicos são gerados dentro de reatores conectados em delta. Os triplos que “saem” do delta são a composição das componentes de seqüência positiva mais as componentes de seqüência negativa destes 3os harmônicos de corrente. É claro que as componentes de seqüência zero, destes triplos, ficam confinados no delta. Não vão aparecer na linha (secundário do transformador). Ver listagem na Fig. 5.

Normalmente os compensadores estáticos são conectados através de transformadores com o primário em Y e dois secundários um em Y e outro em delta.

Como só existem componentes de seqüência positiva e negativa a composição na alta tensão (primário) é a soma fasorial das componentes dos secundários y e delta sem nenhuma “perda”.

Observa-se, que estes harmônicos triplos estão praticamente equilibrados, possuem a mesma amplitude e sua defasagem é de 120°.

HAR. F	* * COR. LINHA * *			F-F	* * COR. REATOR * *		
	≈ PU	AMP	ÂNGULOS GRAUS		≈ PU	AMP	ÂNGULOS GRAUS
3							
DELTA							
0.4678	35.4280	241.1404		A-B	13.7832	602.7286	183.1052
0.8181	61.9622	90.1588		B-C	13.7832	602.7286	177.2124
0.4678	35.4290	-60.8237		C-A	13.3720	584.7461	180.1588
3							
ESTRELA							
0.4772	36.1440	211.1607		A-B	13.9176	608.6048	-89.8412
0.4772	36.1438	149.1567		B-C	13.5104	590.8010	267.1529
0.8181	61.9614	0.1588		C-A	13.5104	590.8010	-86.8353
A-B	1.0965	83.0484	240.6524				
B-C	1.0965	83.0488	119.6649				
C-A	1.0801	81.8059	0.1583				

Fig. 5. Terceiro Harmônico de Corrente de um Compensador Estático com desequilíbrio de tensão de 2% de seqüência negativa

Supondo que os reatores dos compensadores fossem montados em Y. Não haveria a eliminação dos triplos e na linha (secundário) se teria os mesmos valores gerados.

Observe que, para o caso, eles são gerados praticamente em fase, isto porque são causados por um pequeno desequilíbrio de tensão (2%). No primário, praticamente só se teria a

contribuição de um secundário (Y), pois a maior parte dos componentes do secundário em delta, naturalmente, ficaria confinada. É importante ressaltar que na composição de linha,

no primário as correntes triplas estão praticamente em fase, são praticamente homopolares.

HAR. F	* * COR. LINHA * *			F-F	* * COR. REATOR * *		
	CORRENTES %PU	AMP	ANGULOS GRAUS		CORRENTES %PU	AMP	ANGULOS GRAUS
3 delta							
7.9577	602.7286	183.1052		A-B	13.7832	602.7286	183.1052
7.9577	602.7286	177.2124		B-C	13.7832	602.7286	177.2124
7.7203	584.7461	180.1588		C-A	13.3720	584.7461	180.1588
3 ESTRELA							
8.0353	608.6049	-89.8412		A-B	13.9176	608.6048	-89.8412
7.8003	590.8011	267.1529		B-C	13.5104	590.8010	267.1529
7.8003	590.8011	-86.8353		C-A	13.5104	590.8010	-86.8353
A-B	8.5076	644.3787	-89.8412				
B-C	7.5726	573.5613	266.0693				
C-A	7.5727	573.5620	-85.7518				

Fig. 6. Terceiro Harmônico de Corrente de um Compensador Estático com desequilíbrio de tensão de 2% de seqüência negativa.

## V. RETIFICADORES

Voltando aos retificadores, estes equipamentos, como já foi dito, são as mais influentes fontes de correntes harmônicas no sistema elétrico, quer em porte quer em quantidade. Para uma investigação de sua influência na rede é necessária a avaliação dos harmônicos triplos gerados por eles. Utilizamos para isto o programa HCONV do CEPTEL, entretanto os resultados não foram satisfatórios.

A Fig. 7 a seguir mostra uma listagem de saída de um dos exemplos anexados ao programa. Foi feita uma alteração inserindo 2% de seqüência negativa na tensão de alimentação. O comportamento deste conversor deveria ser idêntico ao do reator, em relação à defasagem dos harmônicos nas três fases, mas observa-se que as fases B e C estão praticamente em fase enquanto a fase A está em oposição a elas.

```

*****
*
*          COMPONENTES FUNDAMENTAL E HARMONICAS DA CORRENTE CA NA LINHA DO CONVERSOR 1/ 4
*          VALORES EFICAZES ( LIGACAO DO TRANSFORMADOR : Y/Y      .00 )
*-----*
* *          FASE A          *          FASE B          *          FASE C          *
*ORDEM*-----*
* *  MODULO !  ANGULO !      *  MODULO !  ANGULO !      *  MODULO !  ANGULO !
* *  ( A)   ! (GRAUS) ! %   *  ( A)   ! (GRAUS) ! %   *  ( A)   ! (GRAUS) ! %
*-----*
* 1 * 2637.5030 ! -18.76 ! 100.00 * 2602.3060 ! -139.39 ! 100.00 * 2595.1950 ! 101.60 ! 100.00 *
* 3 *   49.49 ! -56.41 !  1.88 *   17.99 ! 124.35 !   .69 *   31.50 ! 123.15 !  1.21 *
* 5 *  433.41 !  85.57 ! 16.43 *  464.53 ! -157.50 ! 17.85 *  470.35 ! -32.73 ! 18.12 *
* 7 *  302.67 !  46.81 ! 11.48 *  276.35 ! -77.80 ! 10.62 *  270.12 ! 169.45 ! 10.41 *
* 9 *   32.50 !   6.75 !  1.23 *   11.40 ! -169.91 !   .44 *   21.13 ! -175.05 !   .81 *
* 11 * 101.81 ! 144.37 !  3.86 *  118.89 ! -102.45 !  4.57 *  122.36 !  27.65 !  4.71 *
* 13 *   79.36 !  97.69 !  3.01 *   67.68 ! -31.90 !  2.60 *   63.50 ! -137.52 !  2.45 *

```

Fig. 7. Saída do programa HCONV para um caso exemplo alterado com 2% de seqüência negativa na tensão. Saída das correntes do Conversor Y/Y.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir mostra a composição final de um sistema de industrial de 24 pulsos, o mesmo cujos harmônicos provenientes da ligação Y/Y foram mostrados na figura anterior.

Observa-se que os terceiros harmônicos estão praticamente com 120° de defasagem entre eles. O que não deve estar correta, uma vez que no próprio Y/Y os ângulos são duvidosos.

```

*****
*
*      COMPONENTES FUNDAMENTAL E HARMONICAS DA CORRENTE CA TOTAL DA INSTALACAO - VALORES EFICAZES
*
-----*
*      *          FASE A          *          FASE B          *          FASE C          *
*ORDEM*-----*
*      *  MODULO !  ANGULO !      *  MODULO !  ANGULO !      *  MODULO !  ANGULO !      *
*      *  ( A)   ! (GRAUS) !      *  ( A)   ! (GRAUS) !      *  ( A)   ! (GRAUS) !      *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
*  1 * 10551.55 ! -18.77 ! 100.00 * 10408.15 ! -139.40 ! 100.00 * 10380.34 ! 101.61 ! 100.00 *
*  3 * 103.53 ! -47.96 ! .98 * 102.91 ! -168.38 ! .99 * 102.57 ! 72.13 ! .99 *
*  5 * 1.53 ! -73.42 ! .01 * 1.52 ! 166.24 ! .01 * 1.52 ! 46.64 ! .01 *
* 19 * 2.12 ! -116.67 ! .02 * 2.37 ! -1.89 ! .02 * 2.43 ! 125.62 ! .02 *
* 21 * 19.56 ! 22.52 ! .19 * 23.15 ! 134.81 ! .22 * 23.98 ! -94.20 ! .23 *

```

Fig. 8. Saída do programa HCONV para um caso exemplo alterado com 2% de seqüência negativa na tensão. Saída de algumas das correntes harmônicas totais do Conversor.

A grande maioria dos sistemas industriais de médio porte é de 12 pulsos. Era de se esperar que o valor da composição total da corrente de terceira ordem fosse, pelo menos, igual à corrente do conversor Y/Y, da mesma forma que num compensador estático. As componentes triplas do conversor Y/Δ ficariam confinadas no delta e não “sairiam” para a linha.

O que se apreende disto é que uma análise poderia ser mal interpretada caso se considere apenas os resultados da principal referência do cálculo de harmônicos que é o HCONV.

#### VI COMPOSIÇÃO DE VETORES

A soma fasorial de um sistema equilibrado trifásico defasado de 120° entre si com outro sistema com componentes homopolares, sem dúvida dará um sistema desequilibrado.

#### VII CONCLUSÃO

Nos compensadores estáticos a causa mais influente na geração dos harmônicos tripos é o desequilíbrio de tensão [3]. Ao injetarem estas correntes no sistema elas são praticamente equilibradas defasadas 120° entre si.

Nos conversores o desequilíbrio de tensão também é uma causa de geração de harmônicos tripos. As correntes harmônicas triplas provenientes dos conversores, diferentemente dos compensadores estáticos, que são ligados

internamente em delta, são majoritariamente homopolares (estão em fase). O valor resultante desta corrente, num sistema conversor de 12 pulsos, tem a amplitude de no mínimo a da corrente proveniente do conversor de ligação Y/Y.

O efeito conjugado de correntes triplas de compensadores estáticos somadas às provenientes de sistemas conversores dará origem a correntes triplas sensivelmente desequilibradas. Isto vale também para as tensões harmônicas triplas resultantes causadas por estas fontes

Daí conclui-se que o desequilíbrio de tensões harmônicas, de terceira ordem, observadas nos ensaios na região sudoeste tem uma grande probabilidade de ser causada pelo efeito conjugado das correntes harmônicas triplas vindas dos conversores e de compensadores estáticos.

#### VI. REFERENCIAS

- [1] Ineffectiveness of Transmission Line Transpositions at Harmonic Frequencies. Arrillaga J. Acha E., Densem T.J., Bodger P.S. IEEE Proceedings Vol 133, Pt C, No.2 March 1986.
- [2] Direct Current Transmission. Kimbark E. W. Wiley-Interscience Wiley & Sons 1971.
- [3] Correntes Harmônicas Geradas por Compensadores Estáticos. Vasconcelos A.N., Fonseca L. C. A., Lima M. V. B. VIII SNPTTEE, Brasília, 1983.