

Circuitos com Cabos Unipolares em Paralelo por Fase

A. Reis Miranda
 Eng. Electrotécnico (I.S.T.)

resumo

Principalmente na alimentação de quadros gerais e nas entradas das empresas distribuidoras, é muito frequente o procedimento de agrupar cabos da mesma fase, constituindo esteiras de uma camada de cabos, embora isto possa causar desequilíbrios entre as correntes dos cabos e na estrela de tensões das barras do quadro. Este artigo apresenta o problema e a maneira de evitá-lo em instalações novas, ou corrigi-lo nas instalações existentes.

Electric Circuits

Using Parallel Single-Core Cables

summary

Mainly for feeders to distribution boards from utilities, it is common use to group several cables in one phase, installing the cables side-by-side over a tray. This arrangement can arise unbalanced currents among cables and disturb voltages on board bars. The author discusses the problem, and proposes a solution to prevent such inconvenience in new installations and to delete it in existing ones.

1. Introdução

É comum encontrar esteiras de cabos muito alinhados, comportando vários cabos unipolares em paralelo por fase (Fig. 1). A situação mais usual corresponde à alimentação de quadros gerais ou às entradas da empresa distribuidora. Resulta em geral mais fácil agrupar sucessivamente os cabos da mesma fase.

Esta disposição é muito inconveniente porque origina um forte desequilíbrio entre as correntes nos cabos da mesma fase, além de acarretar um desequilíbrio também na estrela de tensões nas barras do quadro.

O assunto, embora conhecido há muitos anos (ver, por exemplo, a referência [1], de 1957), nem por isso está bem consolidado, continuando a encontrar-se instalações recentes mal montadas. Aliás, o conceituado foro do IEEE apresenta dois artigos sobre esta matéria já na década de 90 [2, 3].

Neste trabalho exemplifica-se, com o cálculo correcto de

situações comuns, a extensão das consequências de uma instalação incorrecta, e os procedimentos não só para evitar estes desequilíbrios em instalações novas, mas também para os diminuir em instalações existentes.

2. Aspectos conceptuais

A circulação de correntes em condutores induz forças electromotrices (fems) nos condutores vizinhos, como mostraram Faraday e Maxwell no século passado. Essas fems são provocadas pelo fluxo de indução magnética associado a cada corrente, o qual está em fase com o ângulo da corrente.

Com uma disposição dos cabos em triângulo, e um sistema de correntes simétrico, a soma dos fluxos (de indução magnética) de duas fases equilibra exactamente o fluxo da terceira fase.

Isto deixa de acontecer para uma disposição em esteira plana, porque a indutância mútua entre os cabos extremos é

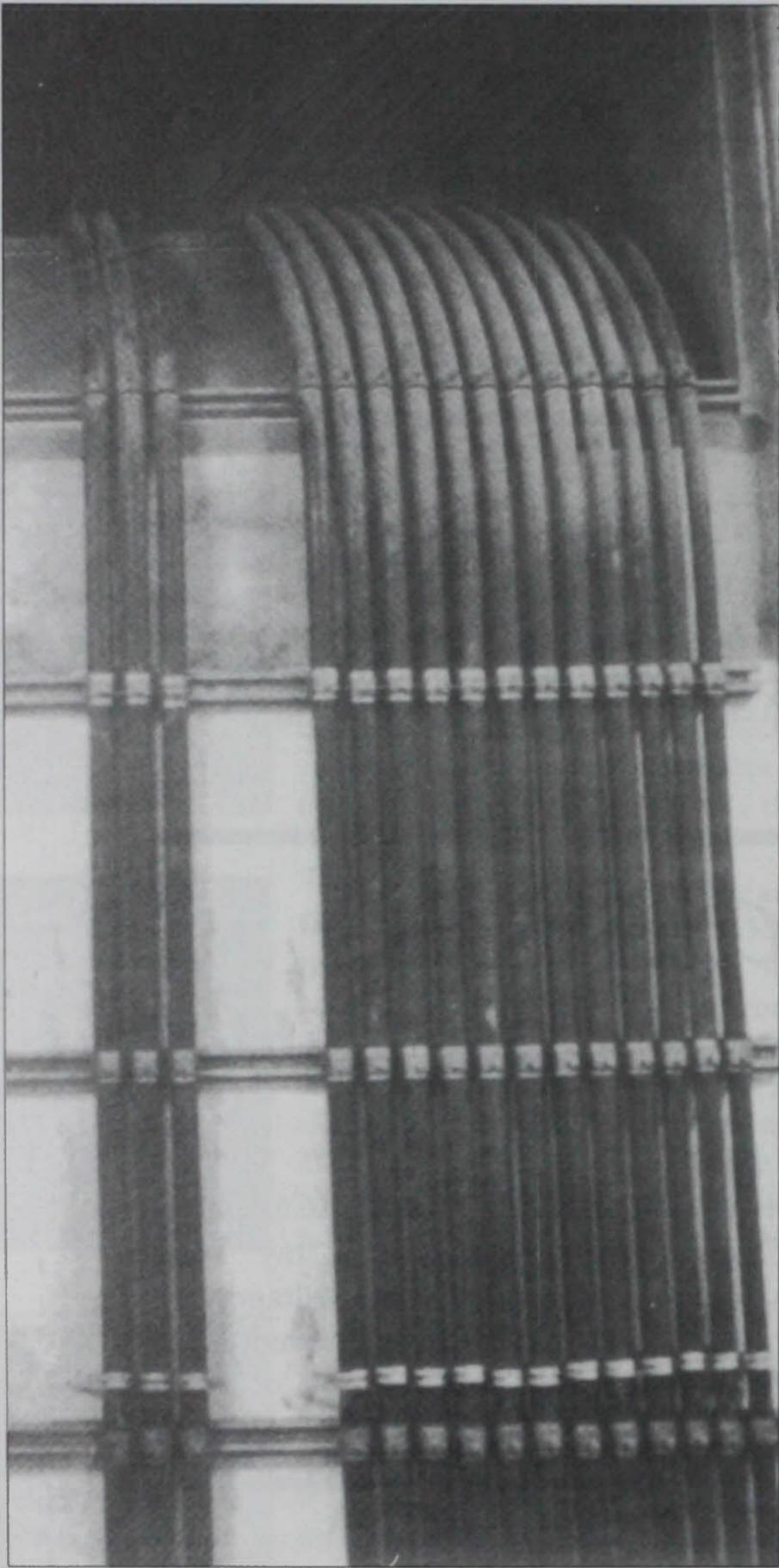


Fig. 1 - Esteira de cabos.

menor que entre qualquer deles e o cabo central. Como consequência, a impedância aparente dos cabos do(s) circuito(s) resulta diferente, mesmo para circuitos sem cabos em paralelo por fase.

Quando esses cabos estão em paralelo, como apresentam impedâncias diferentes, são percorridos por correntes diferentes, não só em módulo mas também em ângulo. Estas diferenças podem ser muito significativas e precisam ser bem apreendidas.

É ainda importante salientar que o fenómeno de indução magnética entre condutores em disposição assimétrica provoca, em geral, transferências de energia activa, resultando frequentemente o aparecimento de cabos com componente resistiva da impedância aparente que é negativa. A componente induzida da resistência aparente não interfere com a

perda óhmica, e traduz apenas a transferência de energia entre circuitos (ou entre cabos do mesmo circuito trifásico).

Como consequência das correntes nos cabos da mesma fase apresentarem ângulos de fase diferentes, resulta que a soma dos valores das correntes é superior ao valor da corrente soma. Este facto, junto com a desigual distribuição das correntes, conduz à perda óhmica global superior à que existiria com a corrente dividida igualmente entre os cabos.

Preliminarmente, para montagem de cabos em paralelo, é fundamental que todos os cabos tenham secção e comprimentos idênticos, sem o que qualquer tentativa de equilíbrio não consegue resolver o problema.

3. Procedimento de cálculo

O procedimento de cálculo consiste em escrever e resolver o sistema de equações correspondente ao sistema a estudar. Antes da disponibilidade de meios expeditos e poderosos de cálculo, a resolução do sistema de equações constituía uma dificuldade apreciável porque se torna necessário processar matrizes com elementos complexos. Essa dificuldade foi contornada: hoje basta ter intenção de empreender o cálculo.

Consideremos o modelo da figura 2.

O sistema de equações da ligação "fonte"/"quadro" é constituído por seis equações, onde cada uma é

$$I_k(R_k + j\omega L_k) + \sum_{i=1}^n I_i \cdot j\omega M_{ik} = E_k$$

sendo o somatório para $i \neq k$.

Como, porém, as quedas de tensão entre a fonte e o quadro são desconhecidas, torna-se necessário introduzir a queda de tensão na impedância da carga, provocada pela soma das correntes nos cabos da mesma fase. Assim, as tensões passam a ser as tensões fase/neutro da rede. Os significados dos símbolos e as expressões para cálculo de L_k e M_{ik} são apresentados no quadro 1.

A matriz característica do sistema de seis equações passa a ser

$Z + Z_c$	$M_1 + Z_c$	M_2	M_3	M_4	M_5
$M_1 + Z_c$	$Z + Z_c$	M_1	M_2	M_3	M_4
M_2	M_1	$Z + Z_c$	$M_1 + Z_c$	M_2	M_3
M_3	M_2	$M_1 + Z_c$	$Z + Z_c$	M_1	M_2
M_4	M_3	M_2	M_1	$Z + Z_c$	$M_1 + Z_c$
M_5	M_4	M_3	M_2	$M_1 + Z_c$	$Z + Z_c$

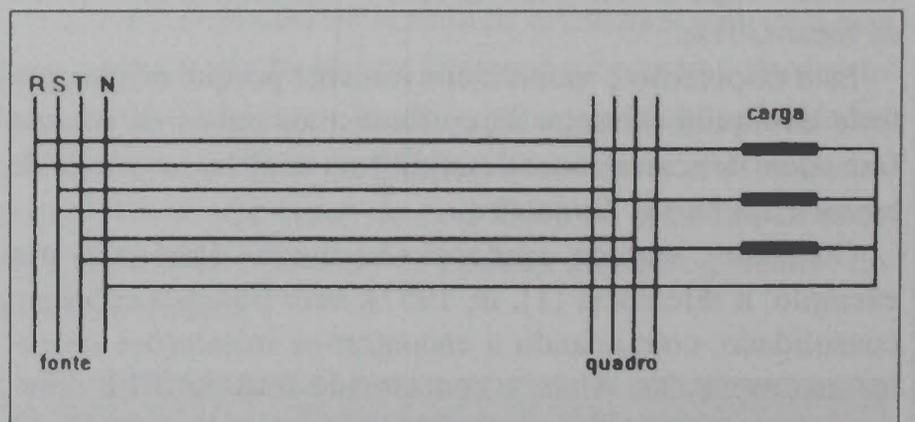


Fig. 2 - Modelo para cálculo.

QUADRO 1
Significados matemáticos.

Significados dos símbolos utilizados:

$Z = R + j\omega L$ - impedância própria de um cabo
 Z_c - impedância da carga (por fase)
 Z_0 - impedância própria de um cabo suplementar de igualização
 $M_n = j\omega M_{ik}$ - indutância mútua entre os cabos i e k , com $n = |i - k|$

Expressão de cálculo das indutâncias próprias e mútuas:

$$L = 2l \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right) 10^{-7} \text{ henry}$$

$$M = 2l \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right) 10^{-7} \text{ henry}$$

onde:

- l - comprimento do cabo
- r - raio do condutor
- d - afastamento entre cabos
- \ln - logaritmo neperiano

onde cada coluna apresenta os coeficientes de cada uma das seis correntes no sistema de equações.

Cada corrente é calculada pelo quociente do determinante da matriz obtida substituindo na matriz característica a coluna de coeficientes dessa corrente pela coluna dos termos independentes, como por exemplo para corrente no cabo um

$$\begin{bmatrix} E_1 & M_1 + Z_c & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ E_1 & Z + Z_c & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ E_2 & M_1 & Z + Z_c & M_1 + Z_c & M_2 & M_3 \\ E_2 & M_2 & M_1 + Z_c & Z + Z_c & M_1 & M_2 \\ E_3 & M_3 & M_2 & M_1 & Z + Z_c & M_1 + Z_c \\ E_3 & M_4 & M_3 & M_2 & M_1 + Z_c & Z + Z_c \end{bmatrix}$$

dividindo pelo determinante da matriz característica.

4. Resultado do cálculo

Admite-se uma fonte com o sistema de tensões simétrico e as seguintes características do circuito:

- tensão fase/neutro : 220 V
- ligação em esteira plana RRSSTT com 50 m de comprimento, com cabos de 300 mm², encostados.
- carga resistiva de 0,244 Ω por fase.

Nestas condições, os valores calculados são como segue:

- Correntes nos cabos
 - $I_1 = 352 / -8,16^\circ$ A
 - $I_2 = 550 / 2,76^\circ$ A
 - $I_3 = 320 / 149,16^\circ$ A
 - $I_4 = 635 / 104,28^\circ$ A
 - $I_5 = 495 / -106,42^\circ$ A
 - $I_6 = 425 / -138,63^\circ$ A

- Correntes por fase na carga
 - $I_R = 899 / -1,5^\circ$ A
 - $I_S = 891 / 118,98^\circ$ A
 - $I_T = 884 / -121,27^\circ$ A

- Tensões nas barras do quadro
 - $E_R = 219,3 / -1,5^\circ$ V
 - $E_S = 217,3 / 118,98^\circ$ V
 - $E_T = 215,7 / -121,27^\circ$ V

As conclusões mais importantes são:

- Se os cabos tiverem sido dimensionados para a corrente média, haverá cabos muito sobrecarregados.
- A estrela de tensões no quadro, em carga, deixa de ser simétrica. Esta assimetria pode causar correntes de circulação em motores ligados em triângulo.
- É fácil concluir que a distribuição desigual das correntes é independente do comprimento da ligação, porque os factores (fems e impedância) são proporcionais ao comportamento da ligação.

5. Montagem melhorada para dois cabos em paralelo por fase

No caso de dois cabos em paralelo por fase existe uma disposição em **esteira plana** que opera com correntes idênticas nos cabos da mesma fase. Essa disposição é RSTTSR (ou equivalente).

Os resultados do cálculo de um modelo segundo esta disposição, em condições idênticas às anteriores, são:

- $I_1 = I_6 = 448,12 / -0,58^\circ$ A
- $I_2 = I_5 = 447,96 / 119,37^\circ$ A
- $I_3 = I_4 = 442,63 / -121,04^\circ$ A
- $E_R = 218,7 / -0,58^\circ$ V
- $E_S = 218,6 / 119,37^\circ$ V
- $E_T = 216 / -121,04^\circ$ V

É curioso salientar que a corrente de neutro neste caso é mais elevado que no caso anterior (13 A em lugar de 8 A), porém as correntes nos cabos da mesma fase são idênticas.

6. Disposição usual para qualquer número de cabos em paralelo por fase

A solução prática mais aconselhada, quando se tem uma ligação com qualquer número de cabos em paralelo por fase, consiste em dispor os cabos em trifólios, com um cabo de cada fase, e colocar esses conjuntos afastados (no mínimo o

diâmetro de um cabo). O resultado seria melhor com esses conjuntos torcidos, mas torna-se, em geral, impraticável torcer três cabos de secção já elevada, a menos que se utilizem cabos tripolares (ou tetrapolares) em paralelo.

Uma disposição circular (difícil de realizar) com os cabos equidistantes e sucessivamente na mesma sequência, RST por exemplo, é a única intrinsecamente equilibrada para qualquer número de cabos.

7. Procedimentos para melhorar uma instalação incorreta existente

Segundo consta em artigo publicado em 1990 [2], pode-se melhorar a distribuição das correntes em esteiras de cabos nus adicionais, curtocircuitados nos extremos. A investigação foi feita na Alemanha e os autores definiram o número e localização dos condutores adicionais que, segundo o estudo, otimizam a distribuição das correntes, para diversas disposições.

Para demonstrar esta solução vamos proceder a um cálculo adicionando dois cabos, um de cada lado, "do lado de fora" da esteira considerada acima. A corrente nos dois cabos, por hipótese, será idêntica e de sentido contrário.

Admitindo que os cabos adicionais são idênticos aos cabos das fases, a matriz característica apresentada no início passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \chi(Z_0 - M_7) & M_1 - M_6 & M_2 - M_5 & M_3 - M_4 & M_4 - M_3 & M_5 - M_2 & M_6 - M_1 \\ M_1 - M_6 & Z + Z_c & M_1 + Z_c & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ M_2 - M_5 & M_1 + Z_c & Z + Z_c & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ M_3 - M_4 & M_2 & M_1 & Z + Z_c & M_1 + Z_c & M_2 & M_3 \\ M_4 - M_3 & M_3 & M_2 & M_1 + Z_c & Z + Z_c & M_1 & M_2 \\ M_5 - M_2 & M_4 & M_3 & M_2 & M_1 & Z + Z_c & M_1 + Z_c \\ M_6 - M_1 & M_5 & M_4 & M_3 & M_2 & M_1 + Z_c & Z + Z_c \end{bmatrix}$$

É interessante salientar que as matrizes de impedâncias correspondentes a redes reais são simétricas relativamente à diagonal principal (em decorrência do princípio de reciprocidade — as impedâncias simétricas são idênticas). Incidentalmente, esta regra é valiosa para a verificação da justeza de uma dedução, como no caso da matriz anterior, cuja organização não é evidente (antes de montada).

É claro que os condutores suplementares apresentam tensão externa nula.

As correntes nos cabos passaram a ser:

- $I_0 = 282 / -129,7^\circ \text{ A}$
- $I_1 = 337 / 3,7^\circ \text{ A}$
- $I_2 = 560 / -4,2^\circ \text{ A}$
- $I_3 = 362 / 143,1^\circ \text{ A}$
- $I_4 = 580 / 104,1^\circ \text{ A}$
- $I_5 = 387 / -113,4^\circ \text{ A}$
- $I_6 = 505 / 126,9^\circ \text{ A}$

Como se vê, a menor corrente é superior à menor do cálculo anterior e, do mesmo modo, a maior corrente é

inferior à maior anterior. Porém, as diferenças não são tão apreciáveis, e até surgem algumas distorções aumentadas relativamente ao caso antecedente. É claro que, diminuindo a impedância dos cabos suplementares, diminui a diferença dos valores máximo e mínimo, relativamente ao valor médio.

8. Disposições equilibradas

Da referência [1] indicada, apresentam-se a seguir os esquemas de disposições equilibradas por fase, isto é, com impedâncias idênticas para os cabos da mesma fase.

□ Dois cabos por fase:

$$\begin{array}{cccc} R_1 & T_2 & & R_1 & R_2 \\ S_1 & S_2 & R_1 & S_1 & T_1 & T_2 & S_2 & R_2 & S_1 & S_2 \\ T_1 & R_2 & & T_1 & T_2 \end{array}$$

□ Quatro cabos por fase: Vale a associação sobreposta da disposição acima com seis cabos em linha e uma disposição em quadrado, como segue:

$$\begin{array}{cccc} S_1 & T_1 & R_2 & S_2 \\ R_1 & & & T_2 \\ T_4 & & & R_3 \\ S_4 & R_4 & T_3 & S_3 \end{array}$$

Aliás, a primeira e a última disposições são de certo modo assemelhadas à disposição teórica em círculo, mas não apresentam impedâncias idênticas para os cabos das três fases.

Obviamente, a identidade das impedâncias *dos cabos da mesma fase* não se altera com uma rotação do conjunto, ou com uma translação paralela das esteiras mostradas afastadas, nas disposições **um** e **três** (podem ficar encostadas).

9. Conclusões

A montagem de cabos em paralelo por fase apresenta particularidades não evidentes, que conduzem a situações não desejadas, principalmente no que respeita à distribuição da corrente total pelos cabos. Além disso, a estrela de tensões do lado da carga pode resultar assimétrica e a soma dos módulos das correntes nos cabos pode ultrapassar o módulo da corrente total por fase.

A igualização das impedâncias dos cabos da mesma fase apenas garante a divisão da corrente entre esses cabos, mas não resolve o problema da simetria das tensões do lado da carga.

A falta de conhecimento generalizado deste importante assunto continua dando lugar a instalações incorrectas, como provam os artigos das referências [2] e [3], publicados já na década de 90 pelo IEEE.

Como se pode deduzir da leitura da referência [3], o problema é mais complexo quando se trata de cabos com blindagens (de média tensão). Este estudo apresenta uma análise e solução para instalações de baixa tensão, e constitui uma chamada de atenção para um problema sério, pouco considerado como tal.