

Distúrbios Causados por Fornos a Arco em Rêdes de Energia Elétrica⁽¹⁾

IVAR BECKIUS ⁽²⁾

MICHEL KOTLAREVSKY ⁽³⁾

R E S U M O

Os fornos de aço construídos nos últimos anos, dimensionados para cargas pesadas e altíssimas potências, solicitam continuamente a rede elétrica com uma carga elevada, exigindo cuidados especiais, quer pela flutuação de corrente, quer pela mudança de tensão. Estas condições exigem que algumas precauções sejam tomadas para evitar êsses distúrbios causados pelos fornos. As soluções são analisadas pormenorizadamente e é acentuada a necessidade de um estudo criterioso de cada instalação para que a solução adequada seja obtida.

1. INTRODUÇÃO

É cada vez mais freqüente o uso de energia elétrica para produção de ferros, aços e suas ligas, aumentando continuamente a porcentagem dêsses metais produzidos por êste processo. Dois são os métodos principais de fusão de metal: por indução e pelo arco, sendo somente a fusão pelo arco empregada para produção de aços, consumindo maior energia elétrica. Em consequência do uso generalizado do método de fusão pelo arco, o tamanho das unidades transformador-forno a arco também cresce, carregando assim as rêsdes elétricas.

Últimamente o forno a arco está sendo utilizado como simples forno de fusão para produção de aços de baixa liga. Os fornos a arco construídos para êsse fim são dimensionados para cargas pesadas e altíssimas potências. Sua operação difere da dos fornos para produção de aços de qualidade: um período de fusão de 1 a 2 h a plena potência é imediatamente seguido por um novo período igual. A rede elétrica, alimenta assim continuamente uma carga elevada. Por outro lado, em fornos convencionais, períodos de plena carga (fusão) são sempre seguidos de algumas horas de carga leve (refino).

A rede alimentadora, freqüentemente, deve ser modificada ou reforçada antes que um novo forno possa ser ligado ou quando novas cargas são ligadas com um forno já existente. Assim, é muito importante saber exatamente quais os requisitos especiais, qualitativos e quantitativos, para a energia a ser fornecida a fornos a arco e as consequências possíveis da instalação dos mesmos na rede e nos seus usuários.

2. O FORNO A ARCO COMO CARGA ELÉTRICA

Pode-se dizer que o forno a arco é uma carga *instável*, especialmente no início do processo de fusão e após recarregamento com sucata. Por várias razões, a carga toca o eletrodo durante êsses períodos; desigualdade de carga, queda da sucata, sôbre-regulação dos eletrodos, etc. . . Todo início de funcionamento de arco é feito pelo contato eletrodo-carga (ignição). Os picos de correntes consequentes dessas ocorrências, provocam alterações de tensões em vários pontos da rede alimentadora. A amplitude das mesmas depende das impedâncias entre o ponto em estudo e a fonte de energia. As flutuações de corrente e consequentes mudanças de tensões são muito irregulares — em forma e amplitude. Isso é válido para todos os tipos de fornos a arco, mas o período de oscilações ocorre apenas durante um período inicial de pouca duração relativa nos fornos de alta potência de operação contínua. Em volta dos eletrodos a carga é aquecida depois de

(1) Contribuição apresentada no Simpósio sobre Eletrosiderurgia no Nordeste; 4.^a Sessão, "Energia Elétrica"; Salvador BA; setembro, 1968.

(2) Engenheiro da ASEA; Vasteras, Suécia.

(3) Engenheiro da ASEA Elétrica S. A.; São Paulo SP.

pouco tempo e crateras se formam: isto resulta numa regularidade maior na operação do forno.

No entanto, após o desaparecimento das oscilações de corrente e tensão, acima descritas, causas *externas* ao arco, outras flutuações menos intensas aparecem devido às mudanças na natureza do arco, causas *internas*, por períodos muito mais longos.

3. O FORNO A ARCO COMO CARGA PERTURBADORA NA RÊDE

O diagrama de carga do forno pode ser usado para ilustrar as perturbações de tensões na rêde (fig. 1). Ele indica entre outras coisas como as potências, ativa e reativa, variam em função da corrente de eletrodo, com tensão constante no secundário do transformador do forno; êsses valores podem ser lidos no próprio painel de instrumentos, durante operação estável do forno. Algumas discrepâncias podem surgir devido à não sinusoidalidade da onda de tensão real. O alto valor das flutuações de tensão é devido principalmente às variações da potência *reativa*.

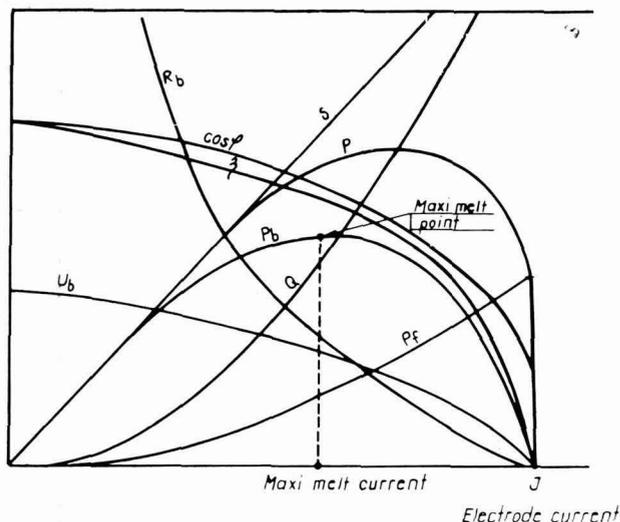


Fig. 1 — Diagrama de carga: S — Potência aparente; Q — Potência reativa; P — Potência ativa; P_b — Potência do arco; P_r — Perda de potência; R_b — Resistência do arco; U_b — Tensão do arco; $\cos \varphi$ — Fator de potência; ξ — Rendimento elétrico.

No início da operação, os distúrbios de tensão causados pelas oscilações de potências reativas devido aos curto-circuitos parciais nos eletrodos possuem frequência de 0,5 a 2 Hz. Os distúrbios subsequentes em iluminação são irregulares e ocorrem raramente.

Numa fase posterior, oscilações regulares podem ser observadas na iluminação, chamadas de "flickers" ou cintilações. Elas são causadas por variações de corrente no arco com amplitude de

± 20 a $\pm 50\%$ do valor médio da corrente (fig. 2). Os distúrbios de tensão consequentes possuem uma frequência de 3 a 10 Hz e são considerados geralmente mais perturbadores do que os raros "piscos" de corrente.

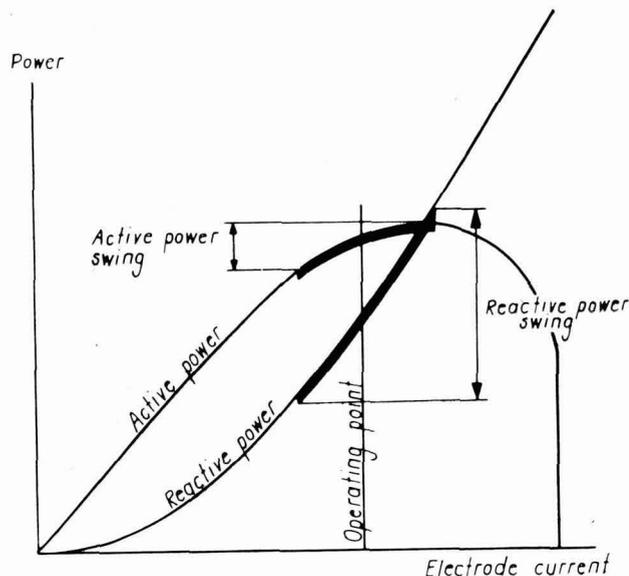


Fig. 2 — Variações de potência.

4. PRECAUÇÕES A SEREM TOMADAS PARA DIMINUIR OS DISTÚRBIOS

Todos os fornos a arco modernos são providos de regulação automática dos eletrodos, permitindo manter o arco numa determinada posição em relação à carga. Uma regulação rápida pode agir no sentido de reduzir a duração dos distúrbios, mas não tem efeito no fenômeno do "flicker" ou de "pisco" devido à variação monofásica de tensão ⁽¹⁾.

Um arco com intensidade elevada é mais estável ⁽²⁾. Uma operação do forno com um comprimento *reduzido* do arco e alta corrente resulta também numa estabilidade maior do arco em possível prejuízo, no entanto, da utilização completa da potência do forno. Um resultado favorável pode ser obtido, projetando-se o circuito do forno de tal modo que a posição do ponto de funcionamento no diagrama de carga seja na região de alta potência, usando-se eletrodos de grande seção. Nesse caso o forno é de construção mais dispendiosa.

Muitas vezes é usado reator, com comutação de taps, em série com o forno. No início da operação uma parte importante do reator é ligada para baixar o nível de distúrbios. Essa solução é econômica do ponto de vista de produção, porém baixa o fator de potência do conjunto.

Se o nível de distúrbios é ainda alto, êstes podem ser reduzidos baixando a tensão de ali-

mentação, obviamente implicando numa diminuição da produção do forno. Pode ser necessária a religação do reator por um tempo curto, após a recarga do forno, até que os eletrodos encontrem uma posição mais estável de trabalho, para poder controlar as oscilações.

Uma carga mais compacta e o uso de sucata uniformemente distribuída é de certa importância para diminuir as oscilações.

Experiências feitas com eletrodos ôcos⁽³⁾ deram resultados positivos, relativamente à estabilização do arco. No entanto, êsse método ainda não teve aplicação prática.

5. INFLUÊNCIA DA DISPOSIÇÃO DA RÊDE

A potência da rêde na barra do forno dita o nível de distúrbios causados pelo mesmo. A figura 3 mostra uma diagrama simplificado de uma rêde:

- ($1/X_n$) — representa potência de curto-circuito da rêde. (p.u.)
- R — representa potência ativa do forno (principalmente o arco).
- X — representa potência reativa do conjunto, *forno-transformador-ligações* até a barra crítica (crítica porque são ligadas outras cargas sensíveis).

A variação de tensão (p.u.) em tôdas as partes da rêde é a mesma da que no barramento crítico, quando a rêde é alimentada por uma única fonte. Assim os distúrbios são os mesmos em qualquer ponto de carga ou iluminação, qualquer que seja sua distância do barramento crítico.

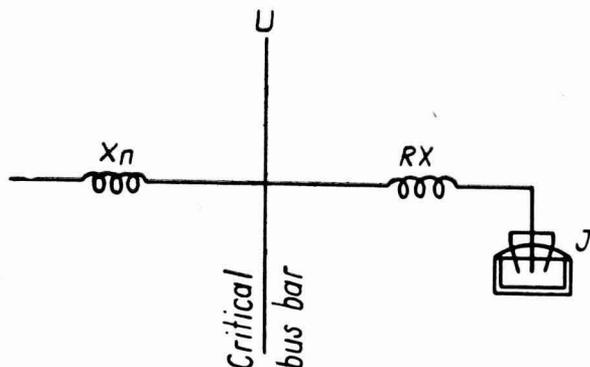


Fig. 3 — Diagrama simplificado de uma rêde: U — Tensão do forno; X_n — Reatância da rêde; X — Reatância; J — Corrente do eletrodo. Voltagem, reatâncias e resistências, referidas ao secundário do transformador do forno.

Isso já não é verdade quando são dois ou mais os pontos de alimentação. Deve-se procurar então uma *potência de curto-circuito equivalente da rêde*, um valor que dê uma variação de tensão equivalente ao valor real obtido, na hipótese

de se colocar na barra do forno o ponto de iluminação.

Êsse aumento do valor da potência de curto-circuito da rêde na barra do forno leva em consideração tôdas as fontes de energia da rêde. De uma maneira geral pode-se desprezar os Ri em face aos Xi.

6. MEDIDAS EXTERNAS AO CIRCUITO DO FORNO PARA DIMINUIR OS DISTÚRBIOS

A potência de curto-circuito da rêde na barra crítica pode ser aumentada direta ou indiretamente, por vários métodos⁽⁴⁾ geralmente dispêndiosos.

Quando o forno e outras cargas são alimentadas por diversas linhas em paralelo e transformadores, pode-se efetuar uma segregação, a fim de que uma linha mais forte alimente apenas o forno.

O aumento da potência de curto-circuito equivalente pode ser conseguido:

- conectando outros geradores.
- interligando a rêde com outra "mais forte".
- usando-se linha de transmissão dupla.
- usando-se capacitor-série na linha de alimentação até o barramento crítico. Êsse método, no entanto, após numerosas investigações efetuadas na Suécia, não foi aprovado sem restrições, malgrado muitas opiniões favoráveis. (5, 6, 7, 8, 23)
- conectando um condensador síncrono à barra do forno. (8, 9, 10, 11, 22) É a maneira mais eficaz, sendo em alguns casos também usada a ligação do C.S. à barra crítica. Não é absolutamente necessária a ligação do C.S. à barra do forno, podendo ser próxima da mesma. (22, 23)

Na Suécia um condensador síncrono com excitação estática ultra-rápida foi aplicada com sucesso, eliminando distúrbios até frequência de 3 Hz. O rotor nesse caso deve ser dimensionado, em termos de isolamento e de condutor, para suportar magnetização forçada.

Às vêzes, um capacitor série pode ser ligado nos terminais do C.S. para melhorar sua atuação, compensando parcialmente a reatância indutiva do mesmo, isto é, aumentando sua potência aparente momentaneamente. (8, 9, 22, 23)

- A colocação de um reator série amortecedor entre a barra do forno e o barramento crítico também melhora a estabilidade (8, 9, 10, 11).
- adição de uma tensão igual (em módulo) e de sinal contrário à variação ocorrida por meio de um transformador especial na barra crítica⁽¹⁴⁾. Êsse método requer um equipamento especial, não tendo por isso maior aplicação prática.
- emprêgo de um reator para aplicação similar⁽¹⁵⁾.
- emprêgo do reator pré-magnetizado em vez do reator série convencional, com pequena vantagem de princípio. (16, 17, 18, 19).

7. DEFINIÇÕES DE LIMITES DE DISTÚRBIOS E VALORES ACEITÁVEIS

Logo no início do emprêgo difundido da energia elétrica domiciliar, procurou-se encontrar os limites de aceitabilidade de distúrbios de voltagem sôbre o sistema fornecedor de energia.

No comêço, os distúrbios investigados eram causados por geradores movidos por máquinas a vapor de êmbolos. Mais tarde, bombas, compressores de êmbolos e laminadores também foram considerados. Todos êles são caracterizados pelas correntes de carga variando com certa regularidade. Entretanto, as variações de voltagem causadas pela operação do forno a arco são de tal forma irregulares, com relação à amplitude e freqüência, que os limites dados pelas curvas determinadas para variações regulares, não podem ser aceitos.

A lâmpada incandescente com filamento de tungstênio é, por seu extenso uso, o objeto mais importante influenciado por variações de voltagem de baixa amplitude. A luz fluorescente também sofre influência, mas de menor intensidade. Entre outros aparelhos sensíveis estão pequenos motores de indução com regime de trabalho intermitente, equipamentos eletrônicos, tais como os televisores, os computadores, etc. Entretanto, equipamentos pertencentes a êste grupo geralmente podem ser providos com estabilizadores. As lâmpadas, por razões econômicas, não podem ser providas do mesmo dispositivo.

A sensibilidade de bulbos para diferentes potências de luz e voltagens tem sido investigada em vários distúrbios de freqüência dentro da faixa dos "flickers", de 3 a 10 Hz ⁽³⁾. O resultado indica que a freqüência de 7 Hz é a mais severa e que a sensibilidade decresce para lâmpadas de baixa voltagem e alta potência luminosa, isto é para lâmpadas providas de filamento com alta capacidade térmica.

A figura 4 mostra o limite de porcentagem aceitável para variações regulares de voltagem — amplitude, sem distúrbios. Como a irregularidade, freqüência e a forma de onda influenciam a irritabilidade da vista, estas curvas dificilmente podem ser usadas para determinar limites aceitáveis de distúrbios causados por forno a arco. Por outro lado, a obtenção de um registro de flutuações de voltagem durante o período de fusão através, por exemplo, de oscilógrafo, é difícil e fastidiosa.

Não existe método padrão para medição direta da sensação de distúrbio. Esforços estão sendo feitos para encontrar um método que permita definir exatamente a irritabilidade do olho humano.

Diferentes métodos estabelecem limites superiores para: — variações de tensão no barra-

mento crítico; — potência nominal do forno e — potência de curto-circuito no forno.

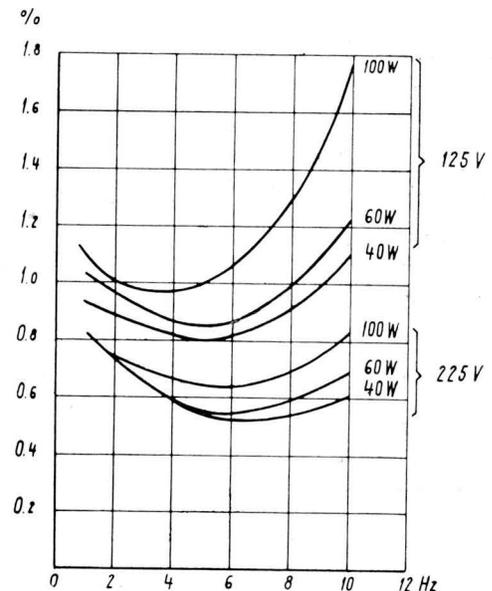


Fig. 4 — Limite dos distúrbios em lâmpadas de filamento de tungstênio em função da freqüência.

Variações de tensão na barra crítica — Os valores indicados vão de 0,3 a 1,2%. Foram propostas graduações nos valores limites, relativas ao tamanho da rede: para rêsdes maiores e operando em tensões mais elevadas os limites porcentuais devem ser mais baixos.

Potência do forno — Êsse limite foi bem estudado num trabalho feito nos Estados Unidos ⁽¹⁴⁾ supondo-se conhecida a potência de curto-

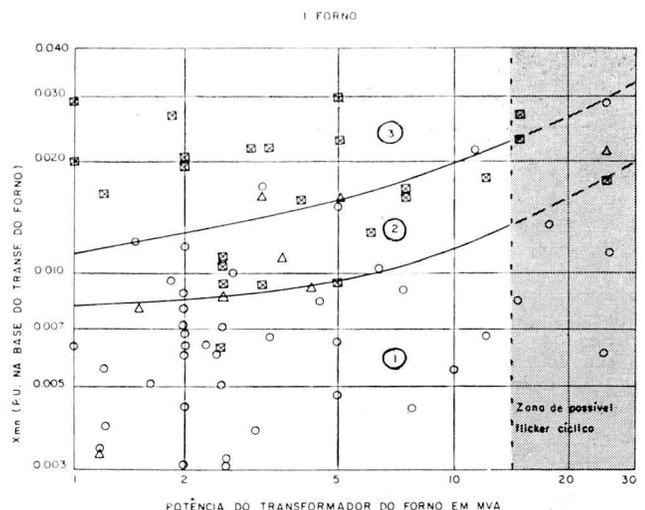


Fig. 5a — Gráfico de X_{mn} em função da potência do transformador de cada forno, para o caso de uma unidade. 1 — Zona satisfatória; 2 — Faixa de tolerância; 3 — zona de reclamações.

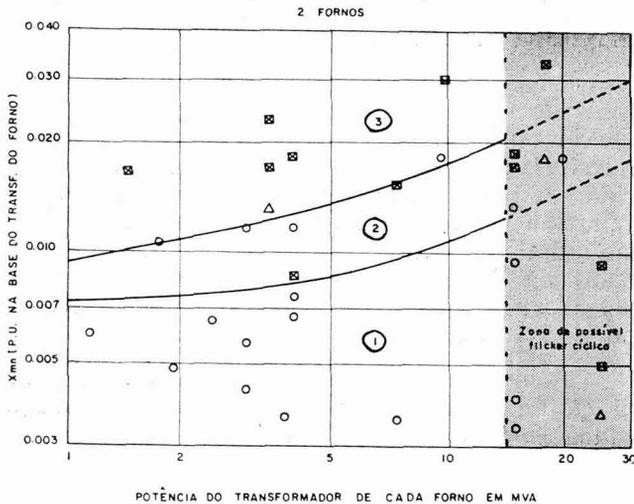


Fig. 5b — Gráfico de X_{mn} em função da potência do transformador de cada forno, para o caso de duas unidades. 1 — Zona satisfatória; 2 — Faixa de Tolerância; 3 — Zona de reclamação.

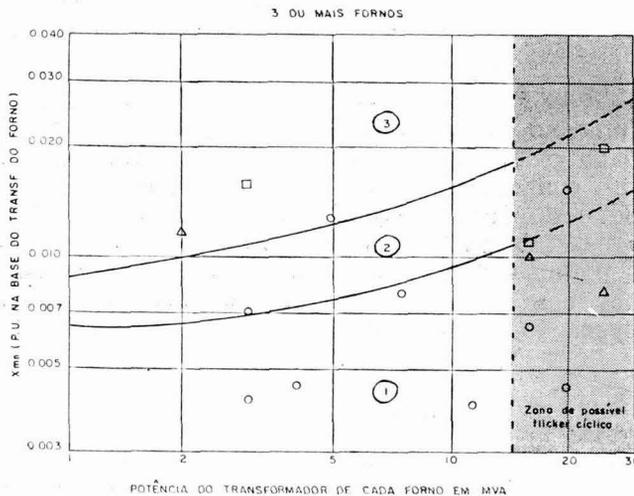


Fig. 5c — Gráfico de X_{mn} em função da potência do transformador de cada forno, para o caso de três unidades. 1 — Zona satisfatória; 2 — Faixa de tolerância; 3 — Zona de reclamações.

-circuito, em 175 fornos diferentes, sendo as lâmpadas de filamento tungstênio para 120 V. Os dados específicos foram:

- P (transformador do forno)
- Curvas das figs. 5 a-b-c — P (curto-circuito rede)
- (Na figura, $X_{mn} = P_{t.f.}/P_{curto}$) — Distúrbios: aceitáveis ou não.

Um trabalho semelhante foi feito na Suécia baseando-se em observações em 25 fornos. A figura 6 é o resultado para operação com um forno. A tensão das lâmpadas é 220 V.

O mesmo tipo de investigações foi feita na Suíça em 20 fornos de baixa potência.

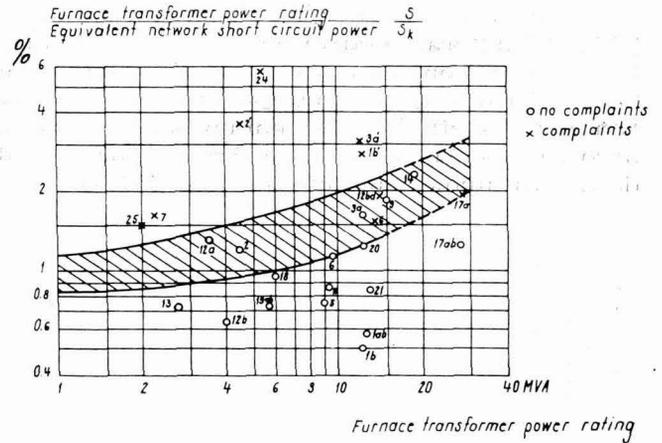


Fig. 6 — Resultados obtidos na Suécia, em 25 instalações, para a operação com uma unidade.

Na figura 7 foram grupados os resultados de todas essas observações: são bem próximos malgrado a diferença de tensões; o caráter subjetivo das avaliações é evidenciado aqui (ver fig. 4).

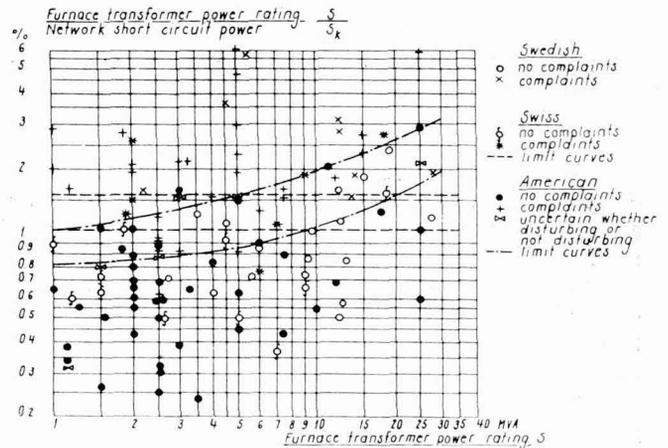


Fig. 7 — Conjunto dos resultados indicados nas figuras 5 e 6.

Potência de curto-circuito no forno (em relação à rede) — Além da potência do forno, esse critério leva em conta outros parâmetros.

$$u = \frac{P \text{ co.f.}}{P \text{ curto}} = 100 \frac{V_0 - V \text{ curto}}{V_0} (\%)$$

- V_0 = tensão em vazio no barramento crítico.
- $V \text{ curto}$ = tensão em caso de curto-circuito trifásico dos eletrodos com a carga fundida do forno no barramento crítico (condição pior).
- u = queda de tensão entre vazio e curto no forno, no barramento crítico (em %). Um valor de 2% é aceitável. Um valor de 2,5% ou mais, significa distúrbio.
- X_n = $U^2/P \text{ curto}$: reatância equivalente da rede.
- (Ω) (kV) (MVA).
- X = $\sum X_i$ reatância (intermediárias) desde o barramento crítico, até a carga do forno.
- u = $\frac{X_n}{X_n + X} \cdot 100 (\%)$ desprezando resistência.

Esse valor teórico não é atingido na prática porque em geral, o curto no forno não é trifásico. Para fornos comuns um valor de 85% de u é normal. Foi dito que fornos grandes com altas correntes nos eletrodos apresentam em operação um arco mais estável ⁽²⁾. Para esses fornos o valor de u será ainda mais inferior ao valor teórico.

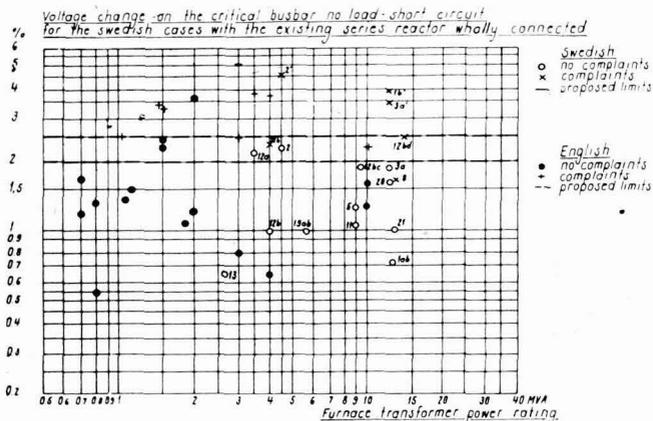


Fig. 8 — Variação de tensões de vazio para curto-circuito observados em fornos na Suécia e na Inglaterra.

Na figura 8 são mostradas curvas calculadas de variações de tensões de vazio para curto-circuito, para um grande número de casos tomados na Suécia e também na Inglaterra ⁽²⁰⁾. Esses últimos pontos foram tomados de ensaios de curto-circuito efetuados em fornos instalados. O mesmo critério de limite superior de 2 a 2,5% foi adotado.

Uma expressão matemática da potência máxima de um forno a ser instalado numa rede, cuja potência de curto é dada, pode ser obtida fixando-se um limite de flutuação de tensão:

$$P_{\text{curto}} = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{2}{1 - \cos \varphi_{co}}} \cdot P_f \cdot \frac{1 - u}{u}$$

Sendo:

$$k = \frac{I_{2n}}{I_{2p \text{ max}}}$$

corrente nominal do eletrodo (Ver diagrama do círculo do forno).
corrente ótima de máxima potência de arco.

$\cos \varphi_{co}$ = fator de potência durante o curto.

P_f = potência nominal do transformador do forno (MVA).

u = variação de tensão permissível de vazio para curto.

$k = 1$ quando I_{2n} corresponde com $I_{2p \text{ max}}$ (condição ideal).

A fórmula acima mostra que a potência necessária de curto da rede cai quando o ponto de

operação se desloca na direção do máximo ⁽²¹⁾ no diagrama de carga.

Uma oscilação superposta resulta quando mais de um forno é alimentado por um mesmo barramento. Para um dado nível de distúrbio admissível, uma potência superior da rede é requerida. A potência real de curto da rede deve ser reduzida para considerações de cálculo de potência admissível do forno. O fator de redução é dado na figura 5 — curvas americanas; para dois fornos iguais é de 0,85 a 0,90 e para três ou mais fornos, é de 0,80 a 0,85.

Fornos com potência igual ou inferior a 75% da potência do maior forno podem ser desprezados do ponto de vista dos distúrbios.

8. CONCLUSÕES

Os problemas dos distúrbios provenientes de operações de forno são difíceis de se resolver, em vista do caráter subjetivo de certos parâmetros e da irregularidade das oscilações causadas pelos fornos.

As curvas citadas, baseadas em experiência, indicando a potência permissível do forno numa dada rede são os critérios mais expeditos existentes, conhecendo-se os parâmetros elétricos da rede e do forno. No entanto, somente o cálculo preciso da potência de curto no forno em relação à potência de curto na rede permite predeterminar com segurança a *aceitabilidade* da futura operação de um forno.

BIBLIOGRAFIA

- DRILLER & ERNST — Vergleichende Betrachtungen über die hydraulischen und elektromotorischen Elektrodenregelungen von Lichtbogen-Schmelzöfen sowie über die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Elektrowärme (1960), Heft Nr. 8.
- ROBINSON & SCHWABE — Ultra-High-power electric steel furnace operation. Journal of Metals, Jan., 1965.
- SCHWABE — Rückwirkungen von Lichtbogenstahlöfen auf Stromversorgungsnetze Elektrizitätswirtschaft 21/1955.
- LANNER & TORSEKE — Das Betriebsverhalten von Lichtbögen-Stahlschmelzöfen und ihr Einfluss auf Drehstrom-Hochspannungsnetze. 5th International Electroheat Congress, Wiesbaden 1963, Paper No. 144.
- ROVA RENZO — Une application de condensateurs en série sur des lignes destinées à l'alimentation des fours à arcs. 5th International Electroheat Congress, Wiesbaden 1963, Paper No. 116.
- ARNOLD — Dämpfung der durch Lichtbogenöfen verursachten Spannungsschwankungen. Electrowärme 9 Jg. (1939), H.3.S.53-58, 3B.

7. CLARKE, CURTIS & POWELL — Capacitors in relation to transient, fluctuating and distorting loads. IEE Conf. Rep. Ser. 8, 1964, p. 31.
8. POLLARD — Synchronous condensers for steel mill service. Iron and Steel Engineer, Jul., 1955, p. 129.
9. KELLER — Massnahmen zur Verringerung der von Lichtbogenöfen bewirkten Spannungsschwankungen. Bericht Nr. 145 and V. Intern. Elektrowärme-Kongress, Wiesbaden, 1963.
10. HARPER, MACON & SEDGWICK — Arc furnace corrective equipment using a high value of buffer reactance. AIEE, 1957, 76 II, p. 74.
11. CONCORDIA, LEVOY & THOMAS — Selection of buffer reactors and synchronous condensers on power systems supplying arc furnace loads. AIEE, 1957, 76, II, p. 123.
12. BOOM & H-W von den PRÖLL — Synchronphasenschicker zur Kompensation schneller Blindlastschwankungen. ETZ-A Bd. 87 (1966), H. 14. S. 527-534.
13. GÄRTNER & ZANDER — Die Bemessungen der Erreger-Decken-Spannung einer Synchronmaschine für Stossblindleistung. ETZ-A Bd. 87 (1966), H.15.S.551-555.
14. GRISCOIN — Lamp Flicker on Power systems, transmission and distribution. Ref. book p. 738, Chapter 22.
15. German "Auslegepatentschrift 1192737" 1. Abr. 1960.
16. KRABIELL — Betrieb eines Bersuchslichtbogenofens mit und ohne vormagnetisierten Drosseln. Ber. 209 2 IV Intern. Elektrowärme-Kongress Stresa 1959, 11 B.5 und.
17. DIXON, FRIEDLANDER, SEDDON & YOUNG — Static shunt compensation for voltage-flicker suppression. IEE Conf. Rep. Ser. 8, 1964, p. 45.
18. HAZUMO & YOSHINO — Reduction of current fluctuations and efficiency improvements by power saturable reactor in steel melting arc furnace operation. 5th Int. Congr. on Electro-heat, 1963, N. 142.
19. FRIEDLANDER — Voltage-flicker compensation. GEC Journal, Vol. 29.
20. KENDALL — Light flicker in relation to power system voltage fluctuations Proc. IEE, Vol. 113, No. 3, Mar. 1966, p. 471-479.
21. FORST — Aussprache zum Thema: Netzbeeinflussung durch Lichtbogenöfen. Elektrizitätswirtschaft, 55 Jg. (1965), H.9, S.290-292, 3B.
22. WIKE MICHIELSON — Technical problem of (23). AIEE pg. 519, Vol. 70, 1951.
23. BLACK LISCHER — Series Capacitor with synchronous condenser for Reducing Voltage flicker. AIEE, Vol. 70, pag. 144, 1951.
24. HANS PETER FLAATHE — Capacitores em série nos fornos elétricos de redução. Engenheiro Moderno, Vol. I, N.º 7, Abr. 1965.