

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

**Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas**

BT/PEA/9514

**Investigação Experimental sobre os
Arcos Sustentados em Sistemas
Elétricos de Baixa Tensão**

**Francisco H. Kameyama
Geraldo Francisco Burani**

São Paulo - 1995

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada por Francisco H. Kameyama, sob orientação do Prof. Dr. Geraldo Francisco Burani: "Investigação Experimental sobre os Arcos Sustentados em Sistemas Elétricos da Baixa Tensão", defendida em 22/08/95, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP.

Kameyama, Francisco H

Investigação experimental sobre os arcos sustentados em sistemas elétricos de baixa tensão / F.H. Kameyama, G.F. Burani. -- São Paulo : EPUSP, 1995.
p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/9514)

1. Arcos elétricos (Engenharia elétrica) 2. Distribuição (Energia elétrica) I. Burani, Geraldo Francisco II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

CDD 621.31
621.319

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE OS ARCOS SUSTENTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO

Francisco H. Kameyama
Instituto de Eletrotécnica e Energia da
USP-IEE/USP

Geraldo F. Burani
Escola Politécnica da
USP-EPUSP

Resumo

A necessidade de se utilizar tensões nominais elevadas (acima de 220/127 V), consequência do aumento da potência das instalações elétricas, pode levar a um aumento da probabilidade de ocorrência arcos elétricos sustentados nessas instalações.

O objetivo principal deste estudo foi determinar, através de ensaios realizados em laboratório, a possibilidade da sustentação de arcos, após a sua ignição, em sistemas elétricos de 380/220 V e 220/127 V.

Os ensaios consistiram da ignição do arco entre dois eletrodos constituídos de barra de cobre e placa de aço e verificação de seu desenvolvimento. A ignição do arco foi obtida pela fusão e vaporização de fio de aço conectando os eletrodos.

Foram realizados ensaios na configuração monofásica em 220V e na configuração trifásica em 380/220 V e 220/127.

A partir da análise dos resultados de ensaios foram obtidas as seguintes conclusões principais:

- em sistemas elétricos de tensão nominal 380/220V, uma vez ocorrida a ignição do arco, a possibilidade dele se sustentar por períodos longos é relativamente grande;
- em sistemas elétricos de tensão nominal 220/127 V a possibilidade de ocorrência de arcos elétricos de longa duração é muito pequena, mesmo com espaçamento de 2,5 cm entre partes metálicas de potenciais diferentes;
- para uma dada tensão nominal do sistema, existe uma forte dependência da duração do arco com a distância entre eletrodos, sendo a duração média do arco proporcional ao inverso da distância;
- o dano no eletrodo é proporcional à energia do arco, sendo portanto, imperativo evitar arcos elétricos de longa duração em sistemas de grande porte.

Abstract

The use of rated voltage higher than 220/127 V may increase the probability of sustained arcing in a network installation.

The aim of this paper is to verify, by laboratory tests, the possibility of sustained arcing occurrence after its ignition, in 380/220 V and 220/127 V installations.

The arcing was obtained by using a steel wire to bridge the gap between the bar and the steel plate. The wire burned off instantly, and the arcing burned continuously or not.

The tests were performed by using 220 V single phase configuration and 380/220 V or 220/127 V three - phase - configuration. From the tests results analysis the conclusion are as follows:

- in 380/220 V rated voltage power systems, if an ignition occurs, the probability of being sustained for a long time is high;
- in 220/127 V rated voltage power systems this probability is small, even in a 2.5 cm gap;
- there is a remarkable dependence between the arc duration and the gap distance. The average duration of the arc is proportional to the inverse distance of the gap;
- the damage of the electrodes is proportional to the arc energy. Then long duration arcing must not be allowed in high power network installations.

I Introdução

A necessidade cada vez maior de instalações elétricas de grande porte leva a uma tendência natural de se aumentar a tensão de operação dessas instalações. Esta prática traz grandes vantagens como, por exemplo, a diminuição do investimento na instalação de cabos bem como a diminuição das perdas de energia por efeito joule.

Por outro lado, sabe-se que, em geral, nos sistemas elétricos os curtos-circuitos mais freqüentes são aqueles que envolvem os condutores vivos (fases) e as massas aterradas. Esses curtos-circuitos quase sempre ocorrem através de impedâncias, sejam elas de arco elétrico, de contato, aterramento ou outros.

Outra constatação é que, principalmente nos sistemas elétricos de baixa tensão, costuma-se efetuar os estudos de proteção de sobrecorrente baseados nas correntes de curto-círcito franco e em geral trifásico.

A utilização do procedimento acima pode resultar num sistema não adequadamente protegido quando forem considerados os dois fatos seguintes:

1. Nos curtos-circuitos que envolvem impedâncias de arcos elétricos, as correntes atingem valores inferiores aos atingidos quando dos curtos-circuitos francos. Este fato acarreta em tempos de atuação elevados dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes;
2. Embora essas correntes sejam inferiores, a energia térmica liberada no arco elétrico é de grande intensidade. Normalmente essa energia é suficiente para a destruição de condutores e isolantes e também para a ignição de materiais combustíveis. Portanto, levando-se em consideração o exposto, constata-se que, quando da ocorrência de arco elétrico em uma instalação, é possível se ter danos significativos nos equipamentos elétricos, mediante a fusão ou vaporização dos barramentos e elementos condutores ou ainda os invólucros. Este fato acarretará interrupção prolongada de energia elétrica, podendo num caso mais grave acontecer um incêndio.

2. Metodologia e Desenvolvimento

Embora os arcos elétricos sejam fenômenos sujeitos a uma série de fatores incontroláveis, e portanto, de comportamento altamente aleatório, foi idealizada e executada uma série de ensaios objetivando os seguintes aspectos principais:

1. Verificação da possibilidade de ocorrência e condições de auto-sustentação de arcos elétricos em sistemas de 380V/220V e 220V/127V;

2. Identificação de parâmetros que afetam o fenômeno e tipo de influência desses parâmetros na auto-sustentação dos arcos elétricos.

Alguns desses parâmetros são:

- tensão de operação do sistema;
- corrente de curto-círcito franco;
- distância entre eletrodos (comprimento de arco).

Os ensaios realizados consistiram basicamente, da ignição de um arco entre dois eletrodos (barramento de cobre (fase) e chapa de aço (terra)) e observação de seu desenvolvimento, sendo registrados os sinais de tensão e de corrente do arco.

Foram realizados ensaios em duas configurações básicas:

- configuração monofásica com tensão de 220 V entre barra de cobre e chapa de aço;
- configuração trifásica com tensão entre barras de 380V ou 220V e correspondentes tensões entre barras e chapa de 220 V ou 127 V.

Em todas as configurações foram feitas calibrações da corrente de curto-círcito franco e do fator de potência do circuito, mediante a interligação dos eletrodos (barra-chapa), por meio de uma cordoalha de cobre com impedância desprezível em relação à impedância do circuito.

Para a ignição dos arcos foram utilizados vários materiais condutores (fitas ou fios de aço, cobre, etc.) colocados entre os eletrodos. Com a aplicação de tensão, a corrente provoca a fusão e ou vaporização quase instantânea desses materiais, dando origem ao plasma condutor.

De todos os materiais testados para ignição aquele que resultou melhor para o propósito de ignição de arco foi o arame de aço.

Dessa forma optou-se para a realização dos ensaios arames de aço de diâmetros 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm. O ensaio foi iniciado com arame de diâmetro 0,5 mm sendo que, caso não houvesse sustentação do arco, o ensaio era repetido com um arame de diâmetro superior.

Inicialmente foram realizados ensaios com a configuração monofásica com duração total de cada ensaio da ordem de 10 a 30 ciclos. A figura 1 mostra um desenho esquemático dos eletrodos montados em um painel. No caso dos ensaios monofásicos foi utilizado somente o barramento central.

Este procedimento foi adotado considerando estudos efetuados por outros pesquisadores que

consideraram os arcos como auto-sustentados aqueles com duração dentro da faixa de 10 a 15 ciclos [10].

Nessas condições foram obtidos arcos sustentados até o final do ensaio, mesmo com capacidades de curto-círcuito franco muito baixas (da ordem de 230A).

Nesses ensaios iniciais foi constatado que arcos de curta duração não causam efeitos destrutivos consideráveis do ponto de vista da proteção. Decidiu-se então verificar as possibilidades de sustentação dos arcos por períodos maiores e deste modo o tempo de duração dos ensaios foi aumentado até que ocorresse danos importantes nos eletrodos.

Para a realização dos ensaios trifásicos em 380/220 V foi utilizada a montagem indicada na Figura 1.

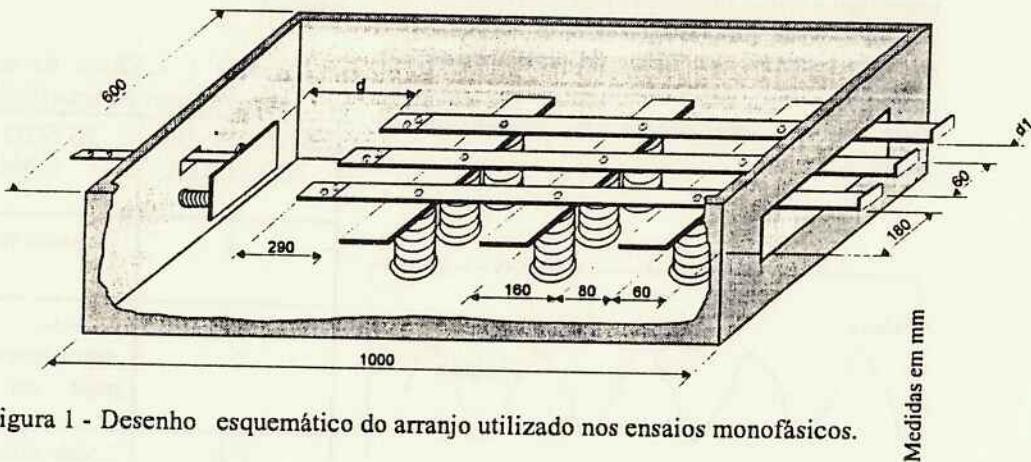


Figura 1 - Desenho esquemático do arranjo utilizado nos ensaios monofásicos.

Nesses ensaios as distâncias entre os barramentos das fases A e B e das fases B e C foram mantidos constantes e iguais a 2,5cm.

Foram variadas as distâncias entre as pontas dos barramentos e a placa de aço (distância entre eletrodos).

Nessas condições foram provocados arcos entre a extremidade de uma barra e a chapa de aço (neutro) aterrada sendo verificado o desenvolvimento dos mesmos.

Foi também verificada a influência causada pela inserção de resistência de $5\ \Omega$ no aterramento do neutro na sustentação dos arcos.

Ainda com esta configuração foram provocados arcos entre barramentos (fases) a diferentes distâncias da placa (neutro) aterrada. Este procedimento foi adotado de modo a verificar a propagação ou não do arco para as partes sãs.

Para realização dos ensaios trifásicos em 220/127 foi utilizada a mesma configuração dos ensaios trifásicos com a tensão de 380/220 V.

Nesse caso a distância entre os barramentos foi mantida a mesma (2,5 cm) e a distância entre as extremidades dos barramentos e a chapa de aço (neutro) foi mantida constante e igual a 2,5cm.

O procedimento de ensaio foi o mesmo utilizado nos ensaios trifásicos com tensão de 380/220 V.

Adicionalmente, neste caso, foi verificada se a presença de chama entre os eletrodos tem influência no fenômeno ou na propagação do arco elétrico para as partes sãs. A chama foi provocada pela combustão de algodão embebido em hexana colocado entre os eletrodos.

3. Análise dos Resultados de Ensaios

3.1. Sobre a Ignição dos Arcos

Sempre que se deseja reproduzir fenômenos elétricos aleatórios em laboratório é bastante complicado.

Este caso não foi exceção. A forma, o tipo de material, a forma de fixação desse material entre os eletrodos se mostraram ter influência sobre a duração do arco após a sua ignição.

Nos primeiros ensaios foram pesquisados diversos materiais como por exemplo: cobre (na forma de fita), aço ou ferro (na forma de arame, fita e lã).

De todos os materiais e formas utilizados, os melhores resultados para esta pesquisa foram obtidos com fios de aço presos firmemente nos eletrodos. Resultado disso é que a partir do ensaio 71 optou-se por utilizar somente o fio de aço de bitolas 0,5mm, 1mm e 1,5mm.

3.2 Medições realizadas

Sobre os oscilogramas obtidos, foram efetuadas diversas medições como por exemplo duração total do ensaio, duração do arco, corrente do arco, tensão do arco e tensão da fonte.

Para a medição da tensão de arco e corrente de arco foram desprezadas as componentes transitórias iniciais, bem como os "picos" de curta duração presentes nos oscilogramas da tensão de arco.

Devido à ocorrência de variações na amplitude de até 25% entre diferentes ciclos, para os diversos casos foi estimado um valor intermediário que refletisse o comportamento médio durante o ensaio.

No ensaio nº 135 realizado na configuração monofásica com a distância entre eletrodos de 4cm e a corrente de curto-círcuito franco de 2,6 kA foi feito um registro dos sinais de tensão de arco e corrente de arco com a escala de tempo ampliada. Parte deste oscilograma está reproduzida na figura 3.

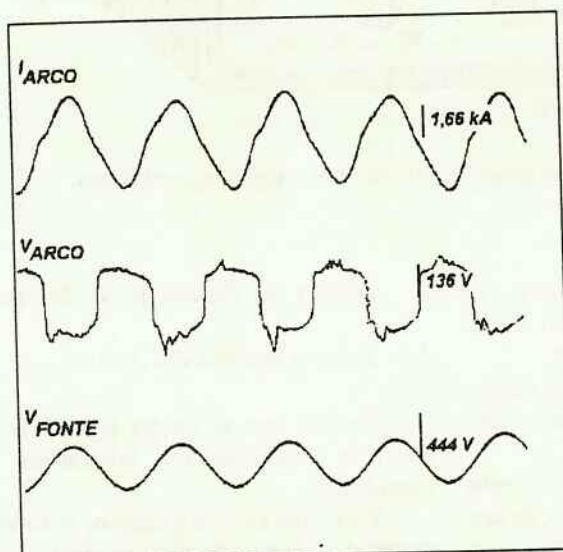


Figura 2 - Oscilogramas obtidos no ensaio nº 135 com escala de tempo expandida

A partir desse registro foi calculada a energia do arco em um ciclo. Esse cálculo foi efetuado por integração numérica considerando os oscilogramas originais de tensão e corrente de arco. Essa integração foi repetida considerando uma curva média do oscilograma de tensão.

Os valores de energia obtidos foram iguais para os dois casos.

Adicionalmente foi verificado que essa energia pode ser calculada em função do valor de crista da tensão e da corrente e

arco. Desta maneira se obtém que:

$$\text{energia} \cong \frac{V \cdot I}{100} (\text{kJ em 1 ciclo})$$

onde V é o valor de crista da tensão de arco em volts e I é o valor da corrente de arco em kA.

Considerando que a forma de onda da corrente de arco e da tensão de arco não variam com a intensidade temos uma maneira rápida e fácil de estimar (dentro de um erro de 5%) a energia envolvida em um arco elétrico, bastando para isso conhecer os valores de crista da corrente e tensão de arco e a duração do arco.

A referência [19] apresenta uma tabela onde aparecem os efeitos da energia do arco nos componentes de uma instalação elétrica. Esta tabela um pouco modificada, é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 - Efeito da energia de arco em componentes de uma instalação elétrica.

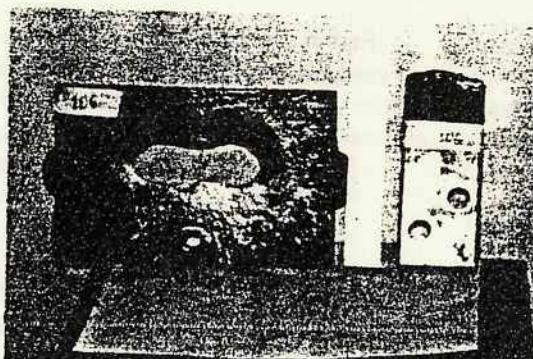
ENERGIA DO ARCO (kJ)	EFEITO SOBRE OS COMPONENTES
2	Pequena marca
30	Dano mínimo; o equipamento pode ser religado após
170	Danos grandes confinados ao cubículo
330	Fusão e vaporização dos barramentos e outros componentes envolvidos.

Com base nessa tabela fica evidente que a máxima energia de um arco elétrico deveria ser limitada a 30 kJ.

Entretanto esse valor é considerado por muitos como bastante conservativo e realmente nos ensaios realizados foi verificado que arcos com energia desta ordem de grandeza não provocaram grandes danos nos eletrodos.

Por este motivo que, ao contrário de outros pesquisadores que realizaram ensaios de curta duração (10 a 15 ciclos), resolveu-se aumentar a duração dos ensaios e verificar a sustentação ou não sustentação do arco durante todo o ensaio [10].

A figura de 4 apresenta foto do eletrodos após a ocorrência de arco entre os mesmos, mostrando o dano causado aos mesmos.



Figuara 3 - Condição dos eletrodos após o ensaio nº 106. Duração do arco: 230 m, corrente do arco: 33 kA, energia envolvida: 745 kJ.

3.3 Arranjo geométrico

O arranjo geométrico utilizado é mostrado na figura 1.

Nos ensaios trifásicos a distância entre barramentos foi fixada em 2,5cm, que é a mínima distância entre elementos em potenciais diferentes, em painéis de tensão nominal 380/220V, conforme a norma brasileira NBR 6808/1981.

Já as distâncias entre barramento e chapa de aço foram de 2,5cm, 5cm e 7,5cm escolhidos a partir da distância mínima recomendada por norma.

Quase que a totalidade dos ensaios foram realizados com os barramentos na posição vertical.

Deste modo os arcos provocados entre os eletrodos ficavam numa posição fixa na qual o comprimento dos mesmos não pudessem aumentar significativamente.

Nos ensaios trifásicos com a ignição do arco entre fases (portanto o arco se iniciava na posição horizontal), o mesmo se deslocava para cima até atingir a placa e se propagava para as outras fases.

O tipo de arranjo utilizado mostrou ter alguma influência no fenômeno de sustentação do arco, particularmente em corrente elevadas. Isto se deve, provavelmente, pela ação das forças magnéticas (sopro magnético).

3.4 Sobre a corrente de arco e a sua relação com a corrente de curto-círcuito franco

As correntes de arco registradas durante os ensaios foram sempre de magnitude inferior às de curto-círcuito franco.

A relação entre os valores de crista da corrente de arco e corrente de curto-círcuito franco foram superiores a 50% para a distância entre eletrodos de 5 cm e 70% para 2,5cm.

Outro fator a ser notado é que estas relações diminuem com o crescimento da corrente de curto-círcuito franco.

Sendo assim pode-se esperar que para corrente de curto-círcuito franco acima de 35 kA ocorram arcos inferiores a 50% das mesmas.

3.5 Ensaios monofásicos

Analizando os resultados dos ensaios, verifica-se que arcos elétricos provocados na tensão de 220V entre fase e terra podem se auto-sustentar por períodos suficientemente longos para provocar estragos consideráveis, podendo, provavelmente, manter-se até a cessação da corrente por meio de dispositivo de interrupção.

Portanto, torna-se imperativo a proteção de circuitos elétricos contra curtos-circuitos envolvendo arcos elétricos, mesmo que as correntes sejam de baixa intensidade. Com já foi visto anteriormente, energia de arco superior a 30 kJ podem causar danos que acarretam interrupções de energia de longa duração.

Os parâmetros elétricos observados durante os arcos (tensão, corrente e resistência de arco) se mostraram fortemente dependentes de dois fatores principais: a distância entre eletrodos ("comprimento do arco") e a corrente de curto-círcuito franco.

As potências de curto-círcuito muito baixas, embora possam sustentar arcos elétricos durante muitos ciclos, não envolvem potência suficiente para a sua manutenção indefinida, ou pelo menos suficiente para causar danos significativos, isto é, a energia envolvida no arco é de baixa intensidade. Nos ensaios realizados os danos considerados significativos ocorreram com corrente de curto-círcuito franco a partir de 3,2 kA.

Foi detectada uma forte dependência entre a duração do arco (e consequentemente da energia envolvida) e a distância entre os eletrodos. Com a distância entre os eletrodos de 7,5 cm não foram observados arcos com duração superior a 10 ciclos. Além disso a duração média dos arcos com a distância entre eletrodos de 2,5 cm foi superior à obtida com a distância de 5 cm.

Este fato sugere que uma maneira de se prevenir arcos sustentados de longa duração em sistemas elétricos de 380/220V é aumentar as distâncias de elementos de potenciais diferentes (por exemplo 7,5 cm ao invés de 2,5 cm conforme adotada pela norma NBR 6808/1991).

Nos ensaios realizados não foi observada diferença perceptível que pudesse indicar a influência do volume de ar disponível sobre a duração do arco.

A título de exemplo, observando os resultados dos ensaios de nº 83 a 93, onde mesmo estando-se próximo de uma condição limite de sustentação (alguns poucos kA de corrente de curto-círcuito franco), o fato de se ter a porta do painel aberta ou fechada não mostrou influência perceptível na duração média dos arcos.

3.6 Ensaios trifásicos

Durante os ensaios trifásicos foi observado que arcos provocados entre fase e neutro ou entre fases podem expandir-se rapidamente para atingir as demais fases.

Foi observado também que em uma fase o arco pode se extinguir e ocorrer a reigrição após alguns ciclos, possivelmente ajudado pelo plasma produzido pelo arco nas demais fases. Dessa forma, é provável que arcos em sistemas polifásicos tenham maior facilidade de sustentação, auxiliado ainda pelo fato de que as correntes nas diversas fases não se anulam ao mesmo tempo.

Outra constatação foi que todos os arcos com duração significativa (acima de 35 ms) envolveram o neutro até o seu final, indicando que a configuração geométrica tem grande influência sobre o fenômeno.

Por outro lado a inclusão de resistor em série com o neutro não influiu significativamente no fenômeno. Este fato é evidenciado em um dos ensaios onde mesmo com o neutro desconectado da placa houve o prosseguimento do arco até o final nas 3 fases. Os arcos entre fases se estabeleceram com o auxílio da placa (que permaneceu não aterrada), como comprova o sinal de tensão entre placa e neutro.

Nos ensaios trifásicos na tensão de 220/127V em que houve chama entre os eletrodos, não foi verificada qualquer influência desta sobre a duração dos arcos. Este fato se deve provavelmente à alta temperatura do arco, ordens de grandeza superior àquela provocada pela chama.

4. Conclusões

O objetivo principal deste estudo foi a possibilidade de ocorrência de arcos elétricos auto-sustentados em sistemas elétricos de distribuição secundária de tensão nominal 380/220 V ou 220/127 V.

Devido a, praticamente, inexistência de ferramentas matemáticas e estudos teóricos sobre o arco elétrico no ar à pressão atmosférica normal, se decidiu por uma investigação experimental com base em ensaios em laboratório.

Embora o fenômeno do arco se mostrou ter um comportamento altamente aleatório, a partir da análise dos ensaios e investigações realizados, algumas conclusões podem ser obtidas:

- Em sistemas elétricos de tensão nominal 380/220 V uma vez ocorrida a ignição do arco a possibilidade dele se sustentar por períodos longos é relativamente grande.
- Para uma dada tensão nominal do sistema, existe uma forte dependência da duração do arco com a distância entre eletrodos. A duração média do arco é proporcional ao inverso da distância entre eletrodos (comprimento do arco). Portanto uma maneira de se reduzir a duração do arco e consequentemente a energia do mesmo, é utilizar espaçamentos maiores (por exemplo 7,5 cm) entre barramentos dos sistemas elétricos de tensão nominal 380/220 V.
- Os danos nos eletrodos (ou partes metálicas de um sistema de potenciais diferentes) aumentam com o aumento da corrente de curto-círcito franco quando da ocorrência de arco sustentado. Isto é decorrente do aumento da corrente do arco e da duração do mesmo, resultando em uma energia maior. Portanto, em sistemas elétricos de grande porte é imperativo evitar arcos elétricos de longa duração.

O limite de 30 kJ citado na literatura, apesar de ser considerado como muito conservativo, deve ser visto com atenção uma vez que energias de arcos superiores a esta podem causar interrupções prolongadas para se fazer as manutenções das instalações.

- A estimativa da energia de um arco (de baixa tensão e comprimento reduzido) pode ser obtida dividindo-se por 100 o produto do valor de crista da corrente de arco pelo valor de crista da tensão de arco.
- Em sistemas elétricos de tensão nominal 220/127 V, a possibilidade de ocorrência de arcos sustentados de longa duração é pequena, mesmo com espaçamento de 2,5 cm entre partes metálicas de potenciais diferentes.

- Em configurações polifásicas, um arco iniciado entre fase-terra ou fase-fase tem grande probabilidade de se propagar para as outras fases. Nesse caso a possibilidade de sustentação de arcos por longos períodos é aumentada devido ao fato das correntes das diversas fases não se anularem ao mesmo tempo.

Referências Bibliográficas

- [1] WAGNER, C. F.; FOUNTAIN, L.L. Arcing fault currents in low voltage ac circuits. *AIEE Transactions*, vol. 67, p. 166 - 74, 1948.
- [2] BURANI, G.F. et al. Experimental investigation on sustained arcing in low voltage power distribution system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SWITCHING ARC PHENOMENA, 7, Poland, 1993. Lodz, Technical University of Lodz, 1993. p. 336-8.
- [3] PARISE, G. et al. Arcing fault in sub-distribution branch-circuits. *IEEE Trans. PWD*, vol. 8, nº 2, p. 580 - 83, April 1993.
- [4] BROWNE JR, T.E. *Circuit interruption - theory and techniques*. New York, Marcel Dekker Inc, 1984. (Electrical Engineering and Electronic Series).
- [5] BROWNE JR, T.E. The electric arcs as a circuit element. *Journal of Electrochemical Society*, p. 27 - 37, Jan. 1955.
- [6] KAUFMAN, R.H.; PAGE, J.C. Arcing fault protection for low voltage power distribution system - nature of the problem. *AIEE Trans. PAS*, vol. 79, p. 160-67, Jun. 1960.
- [7] FISCHER, L.E. Arcing fault relays for low voltage systems. *IEEE Trans. on Appl. and Ind.*, vol. 82, p. 317 -
- [8] SHIELDS, F.J. The problem of arcing faults in low voltage power distribution system. *IEEE Trans. on Ind. Gen. Appl.*, vol. IGA 3, nº 1, p. 15-25, Jan./Feb. 1967.
- [9] LEE, R.H. Pressure developed by arcs. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. IA-23, Nº 4, P. 760-4, July/Aug. 1987.
- [10] FISCHER, L.E. Resistance of low voltage ac arcs. *IEEE Trans. on Ind. Gen. Appl.*, vol. IGA-6, p. 607-16, Nov./Dec. 1970.
- [11] BELAND, B. Considerations on arcing as a fire cause. *Fire Technology*, 1981, p. 188-203.
- [12] DUNKI - JAKOBS, J.R. The effects of arcing ground faults on low voltage systems design. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. IA-8, nº 3, p. 223-30, May/Jun. 1972.
- [13] ELETROPAULO. Relatório da ocorrência no edifício Grande São Paulo, s.d.
- [14] STANBACK JR., H.I. Predicting damage from 277V single phase to ground arcing faults. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 13, nº 4, p. 304-14, July/Aug. 1977.
- [15] STROM, A.P. Long 60 - cycle arcs in air. *AIEE Trans.*, vol. 65, p. 113-17, March 1946.
- [16] FULLER, J.F. et al. Arcing faults in metallic conduit at 120 and 240V. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. IA-21; nº 4, p. 820-25, May/Jun. 1985.
- [17] MENDES, C.L.P. Proteção contra faltas a arco em redes industriais. *Eletrociade Moderna*, p. 20-30, July 1986.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão. Rio de Janeiro, ABNT 1981. (NBR 6808).
- [19] KESSY, F.W.; WARREN, J.L. Design fundamentals for low voltage distribution and control. New York, Marcel Dekker Inc, 1987. (Electrical Engineering and Electronics series).
- [20] ROOP, D.W. Arcing fault protection on VEPCO'S 480/277 V secondary spot network. *IEEE Trans. PAS*, vol. PAS-102, nº 2, p. 364-72, feb. 1983.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO , HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELIOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abrigadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9512 - Avaliação da Severidade da Poluição para o Dimensionamento da Isolação das Redes Elétricas - ARNALDO G. KANASHIRO, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9513 - Processos Auto-Adaptativos para Cálculo de Campos Eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos - LUIZ LEBENSZTAJN, JOSÉ ROBERTO CARDOSO