

Análise das Correntes Transitórias de Inrush em Redes de Distribuição

Hamilton G. B. Souza

Resumo-- O presente trabalho tem como objetivo analisar as Correntes de inrush (magnitude) que surgem nos momentos de energização dos alimentadores dos sistemas de distribuição. Foram estudadas 291 amostras extraídas de oscilografias de medidores alocados nas saídas de alimentadores de distribuição, os quais armazenaram informações de tais correntes em carga quente e em carga fria. Os valores (em magnitude) das correntes de inrush foram analisados nos primeiros instantes (16,66 ms e 100 ms), onde os mesmos foram estudados como sendo variáveis probabilísticas. As análises fundamentaram-se na comparação dos dados oriundos das medições com os resultados de cálculo segundo o modelo tradicional (aplicação de fatores multiplicativos em função do número de transformadores atendidos pelos alimentadores), na qual se observa uma clara majoração que tende a sobredimensionar as correntes resultantes.

Palavras Chaves—Correntes de Inrush, Proteção, Redes de Distribuição

I. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, observa-se que os equipamentos de proteção evoluíram bastante em relação às funções de proteção, confiabilidade, automação, compatibilidade de suas dimensões, e outros itens referentes aos equipamentos em si, porém, nos sistemas elétricos protegidos por estes, no tocante aos valores das correntes de inrush, poucos tópicos foram descobertos ou evoluídos nos últimos anos. Por conseqüência disto, pouco se sabe de fato sobre o impacto deste fenômeno em determinadas funções de proteção (função instantânea de fase e de neutro – 50/50N; função temporizada de fase e neutro 51/51N) [1] em redes de distribuição.

Desta forma, as correntes de inrush na maioria das vezes são importantes nas tomadas de decisões nos momentos de estudos para dimensionamentos e ajustes desses dispositivos de proteção, e tendo em visto isso, o principal objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de estudo para a determinação dos valores frequentemente alcançados (em magnitude) pelas Correntes de Inrush dos alimentadores de distribuição em média tensão. Este método é discutido e comparado com os métodos tradicionais os quais são utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia,

nos quais se baseiam em fatores multiplicativos das correntes nominais dos alimentadores.

Desta forma este trabalho sugere a adoção de valores mais adequados e que tendem a garantir uma aproximação mais consistente com as medições em campo.

Foi analisado se a magnitude das correntes de inrush é relevante em função da potência de curto-circuito em cada uma das subestações estudadas, comparando os seus respectivos valores obtidos.

Este trabalho fundamentou-se em análises de campo, onde em sua totalidade, utilizaram-se informações extraídas de ocorrências reais do sistema elétrico da AES-Eletropaulo.

De forma geral, a corrente de inrush de um alimentador pode ser considerada como a somatória de todas as correntes transitórias geradas em cada transformador atendido [2], juntamente com os bancos de capacitores existentes. Onde para cada transformador, a corrente de magnetização correspondente constitui-se num fenômeno transitório para acomodação do campo magnético do núcleo, da condição estável “antes”, para a condição estável “depois”. Surgem altas correntes de magnetização no momento da energização, com intensidades diferentes nas três fases.

II. METODOLOGIA DO TRABALHO

A estimação dos fatores multiplicativos foi feita pela análise das correntes de inrush extraídas das medições e oscilografias, comparando-se os seus resultados com o cálculo elétrico do modelo tradicional.

As medições foram efetuadas nas saídas (disjuntor) dos alimentadores de distribuição em suas respectivas subestações, nas quais foram gravadas nos momentos em que houveram religamentos bem sucedidos (carga quente), bem como em energizações após períodos de algumas horas em que os alimentadores ficaram desligados (carga fria). Desta forma, as medições foram tratadas onde se obtiveram seus respectivos valores médios e máximos (corrente) em 1 e para 6 ciclos (RMS) das energizações através do método dos trapézios [3].

Para a determinação dos resultados das correntes de inrush através modelo tradicional, foi utilizado um Programa computacional denominado Interprote [4], o qual utiliza o referido modelo a partir de arquivo de dados da topologia e equipamentos de cada um dos alimentadores estudados. O método implementado neste programa consiste na utilização de fatores multiplicativos pré-estabelecidos em 22 e 12, respectivamente aos instantes de 16,66 ms (1 ciclo) e 100 ms (6 ciclos), aplicados à corrente nominal referente ao conjunto de transformadores atendidos pelo circuito em estudo. A **tabela I** mostra um exemplo de resultado das correntes de inrush obtidas pelas medições em comparação com as correntes calculadas pelo método tradicional.

Este artigo foi submetido como proposta para defesa de mestrado na Escola Politécnica de São Paulo - EPUSP, departamento PEA, na aérea de Sistemas de Potência em Fevereiro de 2007.

Hamilton G. B. Souza, “Análise das Correntes Transitórias de Inrush em Redes de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, Área de Sistemas de Potência – PEA, Escola Politécnica de São Paulo, 2007.

TABELA I
EXEMPLO DE RESULTADOS DAS CORRENTES DE INRUSH OBTIDAS PELAS
MEDIÇÕES EM COMPARAÇÃO COM AS CALCULADAS PELO MÉTODO
TRADICIONAL

Nesta análise não foram consideradas as correntes de inrush oriundas de religamentos de defeitos permanentes registrados, pois nestas medições, há uma grande probabilidade de existir correntes de defeitos somadas com

Alimentador	I inrush (A) – Medição de casos reais		I inrush (A) – Cálculo Elétrico		Inom
	I _{16,66 ms}	I _{100 ms}	I _{16,66 ms}	I _{100 ms}	
DIA-105	1058	604	23518	13317	1109,8
DIA-106	650	294	32108	18080	1506,7
DIA-113	1119	372	13306	7511	625,9
DIA-114	1147	700	27314	15451	1287,6

correntes de inrush, assim comprometendo o resultado do objetivo do estudo. Ainda neste contexto, visando compatibilizar os dados comparados com respeito à topologia e carregamento dos alimentadores considerados, fez-se uma verificação no banco de dados de ocorrências da AES ELETROPAULO com o intuito de se certificar que não houveram trechos isolados ou queima de fusíveis nas ocorrências analisadas.

A. Determinação das Correntes de Inrush em Carga Quente

Neste trabalho, uma vez que no tocante ao fenômeno da corrente de inrush, onde este apresenta valores aleatórios em um determinado alimentador e sendo que em cada evento o seu valor pode variar, por diversos fatores [5], optou-se por analisar o fator multiplicativo k nos seus instantes notáveis (1 e 6 ciclos) como uma variável de natureza probabilística [6] com média aritmética e desvio padrão.

Desta forma, para a obtenção dos resultados deste tópico foram estudados 104 (cento e quatro) alimentadores de distribuição com uma amostra de 241 (duzentas e quarenta e uma) medições das correntes de inrush de cargas quentes, onde se observou que a distribuição das amostras é aparentemente normal [7], desta forma, para a obtenção dos valores dos fatores multiplicativos k conforme as propriedades da Distribuição Normal, as análises foram efetuadas através de Níveis de Confiança para Valores Críticos Inteiros [8].

Adotou-se 95,45% como nível de confiança, no qual, os resultados foram expressos através da média aritmética das amostras mais dois desvios padrões [8]. Assim, obteve-se o resultado com o valor de **4,65** para o fator multiplicativo k referente aos 241 eventos referentes ao instante 16,66 ms. O valor máximo alcançado entre os 241 eventos foi **8 (oito)**.

Para o instante 100 ms, através do mesmo processo de cálculo, obteve-se o resultado com o valor de **1,96**, onde o valor máximo alcançado entre os 241 eventos foi **2,88**.

A potência instalada do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador é um fator que certamente deve influenciar a magnitude da corrente de inrush. Com base neste aspecto, de acordo com os resultados das 241 amostras, na **tabela II** estão esboçados os valores probabilísticos (obtidos

pelo mesmo processo de cálculo apresentado) referentes ao instante 16,66 ms para algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

TABELA II
FATOR MULTIPLICATIVO K (16,6 MS) EM FUNÇÃO DAS FAIXAS DE CORRENTE
NOMINAL DO CONJUNTO DE TRANSFORMADORES ATENDIDOS PELOS
ALIMENTADORES

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms
0 – 500	5,63
500 – 1000	2,88
> 1000	1,76

Através do mesmo processo realizado para o instante de 16,66ms, a **tabela III** esboça algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos, referentes ao instante 100 ms (6 ciclos) da corrente de inrush em carga quente.

TABELA III
FATOR MULTIPLICATIVO K (100 MS) EM FUNÇÃO DAS FAIXAS DE CORRENTE
NOMINAL DO CONJUNTO DE TRANSFORMADORES ATENDIDOS PELOS
ALIMENTADORES

Em função dos resultados deste trabalho, na **tabela IV**, esta expressada a sugestão referente ao fator multiplicativo k para a obtenção das correntes de inrush em carga quente em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, de acordo com as medições de campo:

TABELA IV
VALORES SUGERIDOS PARA OS FATORES MULTIPLICATIVOS DA CORRENTE
NOMINAL VISANDO À DAS CORRENTES DE INRUSH EM CARGA QUENTE

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 - 500	2,33
500 - 1000	1,28
> 1000	0,67

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 – 500	6	2,5
500 – 1000	3	1,5
> 1000	2	1

B. Determinação das Correntes de Inrush em Carga Fria

Para a obtenção dos resultados deste tópico, foram estudados 38 (trinta e oito) alimentadores de distribuição totalizando uma amostra de 50 (cinquenta) medições de correntes de inrush em cargas frias, onde a análise foi similar à usada para carga quente.

Adotando-se a mesma metodologia de cálculo utilizado para as correntes de inrush em carga quente, obteve-se o resultado com o valor **4,62** para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms. O valor máximo alcançado entre os 50 eventos foi **6 (seis)**.

Para o instante 100 ms, obteve-se o resultado com o valor **4,74**, onde o valor máximo alcançado entre os 50 eventos foi **4,50**.

Desta forma, de acordo com os resultados das medições, na **tabela V** estão esboçados os valores probabilísticos em intervalos de confiança referente ao instante 16,66 ms das correntes de inrush em carga fria, em função de algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

TABELA V

FATOR MULTIPLICATIVO K DAS CORRENTES DE INRUSH EM CARGA FRIA (16,66 MS) EM FUNÇÃO DAS FAIXAS DE CORRENTE NOMINAL DO CONJUNTO DE TRANSFORMADORES ATENDIDOS PELOS ALIMENTADORES

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms
0 – 500	5,08
500 - 1000	2,70
> 1000 *	1,51

A **tabela VI** esboça algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos, referentes ao instante 100 ms (6 ciclos).

TABELA VI

FATOR MULTIPLICATIVO K DAS CORRENTES DE INRUSH EM CARGA FRIA (100 MS) EM FUNÇÃO DAS FAIXAS DE CORRENTE NOMINAL DO CONJUNTO DE TRANSFORMADORES ATENDIDOS PELOS ALIMENTADORES

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 – 500	3,13
500 - 1000	1,54
> 1000	0,48

Igualmente realizado para as correntes em carga quente, na **tabela VII** está esboçada a sugestão deste trabalho referente ao fator multiplicativo k para a obtenção das correntes de inrush em carga fria em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, de acordo com as medições de campo:

TABELA VII

VALORES SUGERIDOS PARA OS FATORES MULTIPLICATIVOS DA CORRENTE NOMINAL VISANDO AS CORRENTES DE INRUSH EM CARGA FRIA

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 – 500	6,0	3,5
500 - 1000	3,0	2,0
> 1000	2,0	0,5

Comparando as **tabelas IV e VII**, os valores dos resultados finais das análises dos fatores multiplicativos k para as correntes de inrush nas condições de carga quente e carga

fria, embora o número de eventos analisados seja distinto entre os dois casos, observou-se que em linhas gerais, as correntes de inrush na condição de carga fria tendem a ser maiores do que em carga quente na maioria dos casos.

C. Análise das Correntes de Inrush com as Potências de Curto-Circuito

Tendo em vista que a potência de curto-circuito também constitui um dos parâmetros que contribuem para a caracterização e magnitude das correntes de inrush em um determinado alimentador [5], neste trabalho analisou-se a relação deste parâmetro com as amostras (carga quente e carga fria) das correntes de inrush estudadas, com o intuito de se observar a interação entre estes dois fenômenos.

De acordo com as informações obtidas neste trabalho, tanto para as correntes de inrush oriundas da condição de carga fria ou de carga quente, nos instantes 16,66 e 100 ms, observa-se que as diferenças de magnitude das potências de curto-circuito nas barras de suprimento dos alimentadores analisados não influenciaram nos valores (em magnitude) das correntes de inrush.

Estes resultados, provavelmente se devem ao fato de que os alimentadores da AES-Eletropaulo os quais foram analisados, tem características similares (distâncias curtas com cargas concentradas), bem como os níveis de curto-circuito das subestações.

É muito provável que a potência de curto-circuito influencia na caracterização dos valores das correntes de inrush tratando-se nos pontos de inserção de cada um dos transformadores ao longo dos alimentadores, e não nas barras de suprimento na subestação.

III. CONCLUSÃO

Este trabalho contemplou a avaliação dos valores alcançados (magnitude) pelas correntes de inrush nas saídas dos alimentadores primários de distribuição da AES-ELETROPAULO.

Desta forma, os métodos utilizados consideram algumas simplificações que permitem estimar a corrente de inrush como função de fatores multiplicativos aplicados sobre a corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador.

As análises descritas nesta dissertação referentes à corrente de inrush fundamentaram-se na comparação dos dados provindos de medição com os resultados de cálculo segundo o modelo tradicional (aplicação de fatores multiplicativos), onde se observa que o modelo tradicional apresenta uma clara majoração a qual sobre-dimensionam as correntes resultantes. Desta forma, este trabalho viabilizou a sugestão de valores (ou faixa de valores) mais adequados e que tendem a garantir uma aproximação mais consistente com as medições.

Comparando os valores dos resultados finais das análises dos fatores multiplicativos k para as correntes de inrush nas condições de carga quente e carga fria, embora o número de eventos analisados seja distinto entre os casos, observou-se que em linhas gerais, na condição de carga fria tendem a ser maior do que em carga quente na maioria dos casos.

Tanto para as correntes de inrush na condição de carga quente como na condição de carga fria, nos dois instantes analisados (16,66 ms e 100 ms), ambas demonstraram uma certa dependência da potência instalada total e da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, uma vez que o fator k ajustado é decrescente à medida que se aumentam estes parâmetros.

Observa-se também que tanto para as correntes de inrush na condição de carga fria quanto na condição de carga quente, nos instantes 16,66 e 100 ms, as diferenças de magnitude das potências de curto-circuito nas barras de suprimento dos alimentadores analisados não influenciaram nos valores (em magnitude) das correntes de inrush, provavelmente devido as características similares dos alimentadores (curtos e com carga concentrada) e subestações (níveis de curto circuito parecidos em magnitude).

IV. REFERENCIAS

- [1] Giguier, Sergio - **Proteção de Sistemas de Distribuição**. Porto Alegre, Sagra Livraria Editora, 1988.
- [2] Maezono, P. K. - **Análise de perturbações – parte 1 – Conceitos e conhecimentos básicos**. Apostila técnica Schweitzer Engineering Laboratories, Brasil Ltda. 2001
- [3] Granville, W. A.; Smith, P. F.; Longley, W. R. - **Elementos de Cálculo Diferencial e Integral**. Editora Científica, Rio de Janeiro, 1961
- [4] Antunes, A. U., Rosa, P. S., Kagan, N. - **Diagnóstico dos sistemas de aquisição de dados da AES ELETROPAULO**. Documento técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERQ-USP / AES ELETROPAULO, Agosto de 2005.
- [5] Furh, R. E. - **Power quality and protective device coordination: Problems & Solutions Part 2 – High inrush currents for dry type transformers**. P.E., January 1999.
- [6] Costa Neto, Pedro Luiz de Oliveira – **Estatística**. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1977.
- [7] Gibbons, J. D. - **Nonparametric Statistical Inference**. McGraw-Hill, New York, 1971.
- [8] Montenegro, Eduardo J. S. - **Estatística programada passo à passo – volume 5**. Centrais Impressoras Brasileiras Ltda, 1980.

V. BIOGRAFIA



Hamilton G. B. de Souza (M^c, F¹⁷) nasceu em São Paulo em 03 de Agosto de 1975. Graduado em engenheiro elétrica (modalidade eletrotécnica) pela Universidade Paulista em 1999.

Recentemente esta obtendo o título de Mestre em Engenharia pela Escola Politécnica de São Paulo, através deste trabalho apresentado. Trabalha como Engenheiro do Sistema Elétrico na AES-Eletropaulo com 7 anos de experiência no setor.