



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/11
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE

**CABEÇA DE SÉRIE DO LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO CIRCUITO A BASE DE REATOR SATURADO:
ENSAIOS DE VALIDAÇÃO**

Marcelo J. A. Maia (*)
Chesf

Luiz A. Magnata da Fonte
UFPE

Marcelo G. Rodrigues
Cepel

Fernando E. F. França
Chesf

RESUMO

Este informe técnico visa apresentar as diversas atividades desenvolvidas na preparação e execução dos ensaios de um Limitador de Corrente de Curto Circuito – LCC a base de reator saturado no Laboratório de Alta Potência do Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica de modo a comprovar toda a pesquisa desenvolvida no projeto de P&D para a sua construção e posterior operação em uma subestação da Chesf. Os ensaios também serviram para fazer o levantamento da curva de magnetização do RSN, “coração do LCC”, além de dá condições para a melhoria do modelo no programa de transitórios eletromagnéticos – ATP. Por fim verificou-se o desempenho do LCC nas condições normais de operação do sistema. Em todos os ensaios o LCC realizou eficazmente o seu papel como será apresentado neste IT.

PALAVRAS-CHAVE

Reator Saturado, Equipamento, Limitação de curto-circuito, Sobretensões, Ensaio, LCC.

1.0 - INTRODUÇÃO

A expansão da demanda requerida pelo país função do seu crescimento populacional e industrial e a diversificação da matriz energética com uma forte inclusão de fontes térmicas e eólicas em diversos pontos do sistemas sem um controle de onde essas fontes devam ser instaladas, tem levado a uma superação, muitas vezes precoce, de diversos equipamentos das empresas de transmissão e distribuição.

A busca de uma solução para esse problema tem levado as empresas a escolha de diferentes opções, sendo a mais comum a substituição dos equipamentos superados por outro de maior capacidade. Apesar da Chesf também adotar essa solução, a mesma tem ciência de que tais soluções são provisórias, uma vez que novas fontes reativará a problemática anterior.

Por essa razão a Chesf decidiu estudar a tecnologia dos Limitadores ativos de Corrente de Curto circuito - LCC, os quais somente atuam quando da ocorrência de um defeito que, ao contrário dos elementos passivos, não permanecem em operação durante a condição normal do sistema elétrico.

As opções oferecidas pelo mercado mostraram-se bastante dispendiosa, devido ao uso da tecnologia baseada em Eletrônica de Potência, de modo que a Chesf decidiu investigar outras alternativas, particularmente a opção que faz uso do Reator com Saturação Natural - RSN, uma vez que este dispositivo estava sendo investigado em um outro projeto de P&D na compensação de linhas de transmissão. Tais fatos foram apresentados durante o XXI SNTPEE de 2011 [1], que consistiu basicamente da apresentação no modelo do LCC no programa de transitórios eletromagnéticos - ATP onde foram realizadas várias simulações de aplicação de faltas em uma subestação do sistema Chesf. Nesse mesmo informe foram relatados os estudos de projeto e a construção de protótipos em tamanhos reduzidos para experimentação laboratorial. Com base nos resultados positivos nesses experimentos, a Chesf deliberou elaborar os estudos de projeto e construção de um protótipo em tamanho natural para aplicação na sua rede elétrica.

(*)Chesf- Rua Delmiro Gouveia, 333, Sala D-205, Bongüi, CEP 50.761-901, Recife, PE, Brasil
Tel: (+55 81) 3229-2452 – Fax: (+55 81) 3229-2487 E-mail: mjamaia@chesf.gov.br

Tabela 1 – Resultados dos Ensaio de Modelagem

Ensaio Nº	Configuração		Leituras		
	Posição Comutador	Reator (Ω)	V_{fonte} (V)	V_{reator} (V)	I_{fonte} (A)
1	339	38,75	4.490	4.050	79,79
2	339	37,50	4.500	4.220	81,32
3	339	35,00	4.520	3.870	86,46
4	339	30,00	4.510	4.750	99,76
5	336	20,00	4.400	2.100	162,60
6	336	10,00	4.400	2.240	306,00
7	336	3,75	4.400	2.450	724,39
8	314	4,07	8.100	5.790	1390,00
9	314	3,14	8.080	6.200	1700,00
10	314	1,25	7.940	6.330	3690,00

4.0 - ENSAIOS DE CURTO CIRCUITO

4.1 Montagem

A montagem realizada no laboratório do CEPEL para os ensaios de curto-circuito está ilustrada na Figura 2, onde apenas uma das fases do LCC foi submetida aos testes.

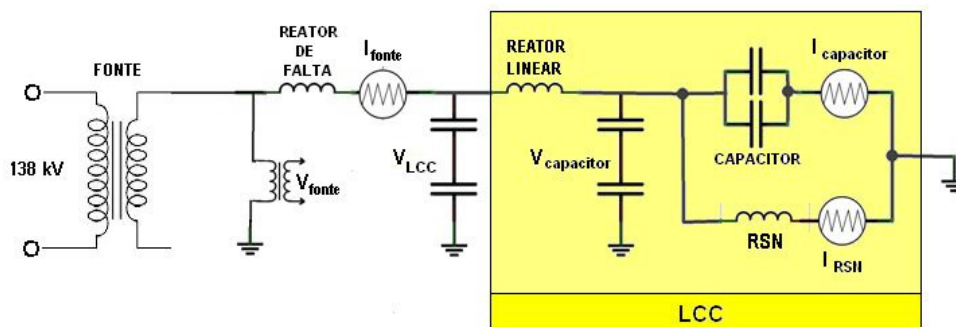


FIGURA 2
Montagem dos Ensaio de Curto

4.2 Leituras

Os ensaios de curto-circuito foram executados no CEPEL no mês de outubro/2013. Os resultados obtidos em cada um desses ensaios foram compilados na Tabela 2 no que tange as tensões e as correntes na fonte, como também com respeito às tensões no banco de capacitores, grandezas de maior interesse para a análise.

Tabela 2 – Resultados dos Ensaio de Curto

ENSAIO Nº	CONFIGURAÇÃO		LEITURAS			
	Posição Comutador	Reator Falta (Ω)	Fonte		Banco Capacitores	
			Tensão Eficaz (V)	Corrente Eficaz (A)	Tensão Eficaz (V)	Tensão Pico (V)
1	339	27,21	4.400	114,8	412	1.300
2	339	2,50	4.050	691,6	2.640	5.040
3	339	1,25	4.390	1070,0	2.800	6.160
4	339	0,64	4.360	1.410,0	3.030	5.810
5	339	0,32	4.460	1.590,0	2.860	5.780
6	328	0,32	5.030	1.960,0	4.440	5.780
7	325	0,32	5.947	2.326,0	4.890	6.540

Para um melhor entendimento do comportamento apresentado pela montagem da Figura 2 durante a ocorrência dos defeitos, um circuito equivalente foi estabelecido para a mesma. Nesse circuito, apresentado na Figura 3, somente as reatâncias dos elementos constituintes da montagem foram consideradas no mesmo. As resistências dos elementos foram ignoradas não somente para simplificação dos estudos, mas também porque, quantitativamente, não exercem uma influência significativa nos resultados por exibirem valores reduzidos, cerca de 100 vezes menor que as reatâncias. Um exame da Figura 3 aponta que, na ausência do LCC, a intensidade da corrente durante os curtos-circuitos, denominada de corrente presumida do defeito, será dada pela relação entre a tensão da fonte e a impedância do reator utilizado para simular a falta:

$$I_{presumida} = \frac{V_{fonte}}{X_{falta}}$$

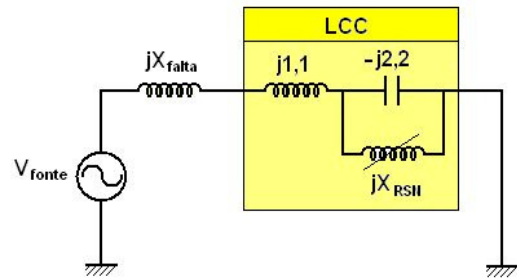


FIGURA 3
Circuito Equivalente

Considerando-se, por outro lado, que o LCC exibe um comportamento ideal, o que capacita este equipamento a remoção integral do banco de capacitores por ocasião dos defeitos, a corrente de falta, agora nomeada de corrente ideal de curto-circuito, será determinada pela reatância de falta acrescida da reatância do indutor do LCC, definida em 1,1 Ω :

$$I_{ideal} = \frac{V_{fonte}}{(X_{falta} + 1,1)}$$

A corrente presumida e a corrente ideal de defeito, calculadas conforme os procedimentos acima, e o valor real da corrente medida nos ensaios estão registradas na Tabela 3 e na Figura 4.

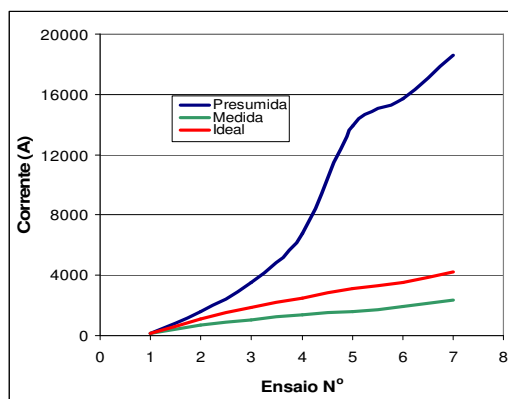


FIGURA 4
Corrente de Falta

Tabela 3 – Corrente de Falta

ENSAIO N°	Corrente Presumida (A)	Corrente Medida (A)	Corrente Ideal (A)
1	161,7	114,80	155,40
2	1620,0	691,60	1125,00
3	3512,0	1.070,0	1.868,10
4	6.812,5	1.410,0	2.505,70
5	13.937,5	1.590,0	3.140,80
6	15.718,8	1.960,0	3.542,30
7	18.584,4	2.326,0	4.188,00

Esses resultados demonstram que o ramo do LCC formado pelo banco de capacitores e pelo RSN é equivalente a um indutor, o qual contribui para reduzir ainda mais a corrente de curto-circuito, proporcionando um desempenho superior ao esperado

5.0 - ENSAIOS DE ENERGIZAÇÃO

5.1 Montagem

A execução nas instalações do CEPEL dos ensaios de energização está ilustrada esquematicamente na Figura 5, onde, outra vez, apenas uma das fases do LCC foi submetida aos testes. Por conta da topologia do laboratório, as partes indutiva e resistiva da impedância de carga foram posicionadas distantes uma da outra com o intuito de tornar mais fácil a feitura das conexões entre os elementos do arranjo.

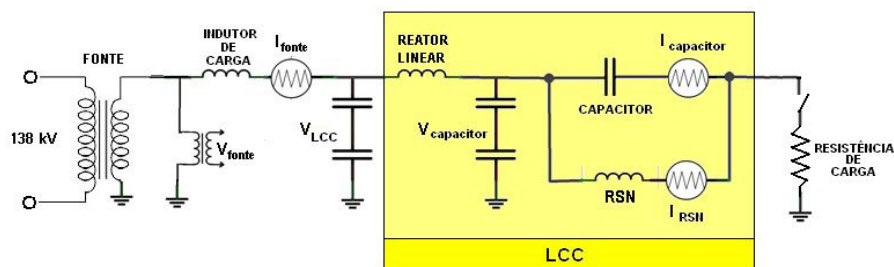


FIGURA 5
Montagem dos Ensaios de Energização

5.2 Leituras

Os ensaios de energização do LCC foram realizados nas instalações do CEPEL no mês de outubro/2014 e os resultados das grandezas de maior interesse estão coligidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos Enasios de Energização

ENSAIO Nº	FONTE		CORRENTE (A)		CARGA (Ω)	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Banco Capacitores	RSN	Reatância	Resistência
1	4.430	96,20	71,22	27,11	22,50	38,20
2	4.410	186,15	137,97	51,33	12,50	19,10
3	4.410	369,66	273,99	101,53	6,25	9,50
4	5.750	482,87	359,05	132,70	6,25	9,50
5	7.070	389,40	2400,00	2630,00	6,25	9,50

Um exame dos dados apresentados na Tabela 4 aponta que, até o Ensaio No4, a corrente de carga era repartida entre o RSN e o banco de capacitores numa proporção aproximada de 1:3, o que significa que o primeiro operava na região linear da curva de saturação. A forma de onda quase senoidal da corrente do RSN nesses ensaios, registros da Figura 6, ratifica tal condição funcional deste equipamento.

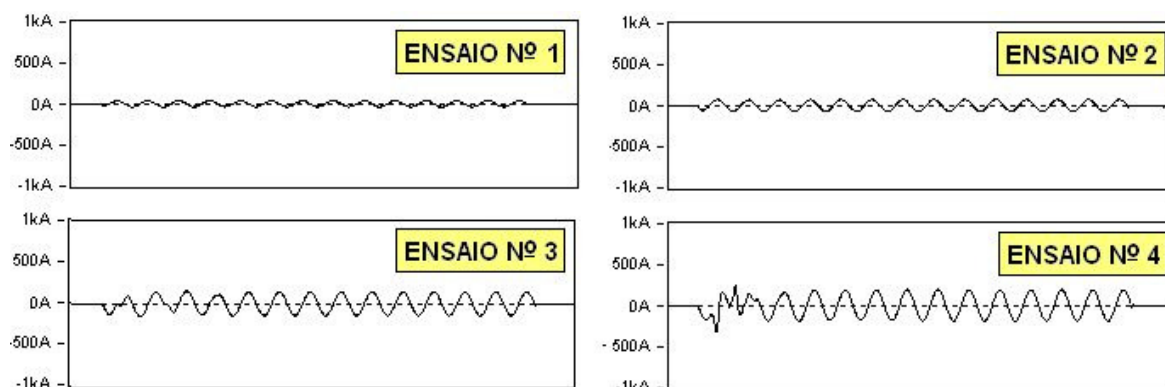


FIGURA 6
Corrente do RSN nos Ensaios Nºs 1 a 4

Também se constata que, até o Ensaio No 4, a presença do LCC no circuito de teste não modificava significativamente o valor da corrente solicitada pela carga. Na Tabela 5, a *Corrente sem o LCC* é calculada apenas com a impedância de carga:

$$I_{semLCC} = \frac{V_{fonte}}{Z_{carga}}$$

enquanto a Corrente com LCC corresponde ao valor efetivamente medido nos ensaios. Como se constata, o LCC praticamente não exerce qualquer influência no funcionamento do circuito para cargas consumindo até 500 A.

Tabela 5 - *Influência do LCC nos Ramais de Carga*

ENSAIO Nº	CORRENTE (A)		ERRO (%)
	Sem LCC	Com LCC	
1	99,92	96,20	3,87
2	193,19	186,15	3,78
3	387,81	369,66	4,91
4	505,71	482,87	4,73

6.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios realizados no laboratório do CEPEL tiveram como finalidade fundamental, a averiguação do desempenho do protótipo do LCC por ocasião dos curtos-circuitos e das energizações, situações operacionais consideradas críticas para uma avaliação cabal do dispositivo. Os resultados obtidos nesses ensaios mostraram que:

- o protótipo atende aos requisitos especificados;
- o dispositivo não interfere nas condições normais do sistema, operando somente quando se estabelece um defeito;
- modificações no projeto do RSN podem reduzir as sobretensões nos bancos de capacitores e assim contribuir positivamente para a redução de custo do LCC;
- é importante que se façam ensaios nos protótipos desenvolvidos de modo a melhor modelar os equipamentos frutos de uma pesquisa.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Marcelo J. A. Maia, Luiz A. Magnata da Fonte, Manoel Afonso C. Jr, Fernando E. F. Freitas, Lucas E. C. Maia, LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO CIRCUITO A BASE DE REATOR SATURADO: COMPARAÇÕES ENTRE MODELO DE ATP E MODELO REDUZIDO DE LABORATÓRIO, XXI SNPTTE, 2011.

(2) Marcelo J. A. Maia, Luiz A. Magnata da Fonte, Fernando E. F. Freitas LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO CIRCUITO A BASE DE REATOR SATURADO: ESPECIFICAÇÃO, ESTUDOS, CONSTRUÇÃO, ENSAIOS E COMISSONAMENTO NO SISTEMA DA CHESF, XXII SNPTTE, 2013.

(3) Marcelo J. A. Maia, Luiz A. Magnata da Fonte, Marcelo G. Rodrigues, Fernando E. F. Freitas, Limitadores de Corrente de Curto Circuito a Base de Reator Saturado - Simulações e Ensaio, XIII SEPOPE 2014.

(4) Relatório CEPEL dos Ensaio

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo José de Albuquerque Maia: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (1978), pós-graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1980) e MBA em Administração de Empresa pela Fundação Getúlio Vargas - RJ (1997). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica e Transitórios Eletromagnéticos, atuando principalmente nos seguintes temas: Transitórios de chaveamento, controle de tensão, compensação de reativos, reator saturado e para-raios.

Luiz Antônio Magnata da Fonte. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1969), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1997) e doutorado em Processamento da Energia pela Universidade Federal de Pernambuco (2004). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Geração e Transmissão de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: controle de tensão, reator saturado, compensação de reativos, reatores lineares, transformadores e máquinas rotativas.

Fernando Edier França Freitas. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2010). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: transitórios eletromagnéticos, reator saturado, compensação de reativos, reatores lineares e transformadores.

Marcelo Guimarães Rodrigues, Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1994), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1997) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2004). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em ensaios em equipamentos de alta tensão e em modelagem de sistema de aterramento. Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.