

Projeto de P&D

Desenvolvimento de um Sistema de
Detecção Online de Falhas no
Isolamento de Motores Elétricos pelo
Método da Resposta em Frequência

Relatório Atividades

Descrição:

Relatório Final das Atividades Realizadas
no Projeto

Relatório EDF

F01-00 / Revisão 00

Código ANEEL

PD-00678-0219/2019

Projeto de P&D

Desenvolvimento de um Sistema de Detecção Online de Falhas no Isolamento de Motores Elétricos pelo Método da Resposta em Frequência

Relatório Final

Atividades Realizadas no Projeto

Relatório EDF-NF
F01-00 / Revisão 00

Relatório Elaborado por:

Erik Leandro Bonaldi
Coordenador do Projeto
Instituto Gnarus

Rafael Bartholomeu Bernardo Carvalho
Gerente do Projeto
EDF

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	IDENTIFICAÇÃO DAS ENTIDADES E RESPECTIVAS EQUIPES EXECUTORAS	11
1.2	ALTERAÇÃO NA EQUIPE EXECUTORA	13
1.3	HISTÓRICO DA LINHA DE PESQUISA.....	16
2	APRESENTAÇÃO DO PROJETO	17
2.1	OBJETIVO DO PROJETO	17
2.2	PALAVRAS-CHAVES	17
2.3	JUSTIFICATIVA DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	17
2.4	ESTADO-DA-ARTE DA ÁREA DO PROJETO	18
2.5	METODOLOGIA ADOTADA NO PROJETO.....	19
2.6	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO	20
2.6.1	Levantamento Estatístico sobre Falhas em Máquinas Rotativas.....	20
2.6.2	Estudo dos Processos de Falhas em Máquinas Elétricas.....	21
2.6.2.1	Mecanismos de falhas em isolamentos.....	21
2.6.2.2	Caracterização das propriedades dielétricas.....	23
2.6.2.3	Perdas dielétricas.....	26
2.6.3	Estudo das Técnicas de Diagnóstico de Falhas em Máquinas Elétricas.....	28
2.6.3.1	Inspeção visual	29
2.6.3.2	Teste de resistência ôhmica dos enrolamentos	29
2.6.3.3	Teste de resistência do isolamento	30
2.6.3.4	Teste do índice de polarização.....	31
2.6.3.5	Teste Hipot (AC e DC)	32
2.6.3.6	Monitoramento de descargas parciais.....	32
2.6.3.7	Medição de capacitância	34
2.6.3.8	Teste da tangente de perdas.....	34
2.6.3.9	Surge test (teste de impulso)	34
2.7	ESTUDO DAS TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA.....	35
2.7.1	Técnica de Espectroscopia Dielétrica (DS)	35
2.7.1.1	Espectroscopia dielétrica no domínio do tempo.....	36
2.7.1.2	Espectroscopia dielétrica no domínio da frequência	41
2.7.2	Técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS/IS)	47
2.7.3	Técnica de Análise por Resposta em Frequência (FRA).....	52
2.7.3.1	Descrição da técnica.....	52
2.7.3.2	Resultados diversos de FRA publicados na literatura científica	55
2.8	ESTUDO DAS TÉCNICAS DE ACOPLAMENTO PASSIVO.....	59
2.8.1	Métodos de Acoplamento Passivo usados em Sistemas PLC.....	61
2.8.2	Métodos de Acoplamento Passivo propostos para FRA On-line de Transformadores	67
2.8.3	Métodos de Acoplamento Passivo usados em Monitoração On-line da Degradação de Isolamento de Máquinas Rotativas	70
2.8.4	Projeto de Acoplamento Passivo	72
2.9	ESTUDO DE TÉCNICAS DE FRA OU PLC QUE NÃO REQUEREM ACOPLAMENTO PASSIVO	75
2.9.1	Técnicas de Geração e Análise de Distúrbios para IFRA.....	76

2.9.1.1	Técnicas de geração de distúrbios IFRA	76
2.9.1.2	Técnicas de análise de distúrbios IFRA.....	78
2.9.2	Técnicas de Compensação Ativa	82
2.10	CONCLUSÕES DESTA SEÇÃO.....	88
2.11	REFERÊNCIAS DESTA SEÇÃO	90
3	ETAPAS DESTE PROJETO	99
3.1	ETAPAS E CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	99
3.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROJETO	102
4	CONTRIBUIÇÕES E ORIGINALIDADE DO PROJETO	237
4.1	ESTUDO DE ANTERIORIDADE	237
4.1.1	Busca no Banco de Dados da ANEEL.....	237
4.1.2	Busca no INPI	238
4.1.2.1	Busca por "Espectro de Impedância"	238
4.1.2.2	Busca por "Isolamento Motor".....	239
4.1.2.3	Busca por "Frequência Isolamento"	240
4.1.2.4	Busca por "Falhas Isolamento"	240
4.1.3	Conclusão da Busca de Anterioridade Realizado antes do Início do Projeto..	240
4.1.4	Busca de Anterioridade Realizado para o Pedido de Patente 1	241
4.1.5	Busca de Anterioridade Realizado para o Pedido de Patente 2	242
4.1.6	Análise da Contribuição do Projeto Face às Patentes Pesquisadas	243
4.2	CONTRIBUIÇÃO AO ESTADO-DA-ARTE	243
4.2.1	Contribuições Científicas do Projeto	244
4.2.1.1	Método para Direcionamento da Corrente de Alta frequência Injetada	246
4.2.1.2	Método para Realizar o Bloqueio Ativo de Tensão da Rede	256
4.2.1.2.1	Métodos Monofásicos para Extração de Referências	256
4.2.1.2.1.1	Método por Adaptive Noise Cancellation (ANC).....	256
4.2.1.2.1.2	Método Goertzel.....	258
4.2.1.2.1.3	Método Notch	259
4.2.1.2.2	Métodos Trifásicos para Extração de Referências.....	260
4.2.1.2.2.1	Método da potência reativa instantânea (p-q)	260
4.2.1.2.2.2	Método da referência síncrona (SRF)	262
4.2.1.2.2.3	Simulação do acoplamento ativo para bloqueio de alta tensão ..	265
4.2.1.2.3	Acoplamento Ativo	266
4.2.1.2.3.1	Prova de conceito do acoplamento ativo	267
4.3	CONTRIBUIÇÕES TECNOLÓGICAS DO PROJETO	283
4.3.1	Dispositivo ativo para direcionamento ativo de corrente de alta frequência em rede energizada.....	283
4.3.1.1	Estudo, Modelagem e Simulação de Bobinas do tipo Rogowski.....	283
4.3.1.1.1	Modelagem matemática de bobinas do tipo Rogowski	285
4.3.1.1.2	Núcleo toroidal com seção retangular	286
4.3.1.1.3	Núcleo toroidal com seção circular	288
4.3.1.1.4	Formulário resumo	289
4.3.1.2	Construção das bobinas.....	290
4.3.1.2.1	Núcleo impresso e bobinagem.....	294

4.3.1.2.2 Varreduras de parametrização nas bobinas	295
4.3.1.2.3 Bobinas com núcleo de ferrite	301
4.3.1.3 Experimentos de acoplamento e desacoplamento das bobinas	309
4.3.1.3.1 Injeção no secundário e medição no primário	309
4.3.1.3.2 Injeção no primário e medição no secundário	320
4.3.1.4 Sistema de Direcionamento da Corrente de Alta Frequência.....	330
4.3.2 Dispositivo ativo baseado em um filtro ativo para testes de máquinas elétricas ou linhas de transmissão energizadas	333
4.3.2.1 Projeto do acoplamento ativo real	333
4.3.2.2 Projeto do Sistema de Bloqueio de Alta Tensão	357
4.3.2.2.1 Definição dos Elementos Passivos de Potência do Conversor MMC Bifásico	357
4.3.2.2.2 Definição dos Circuitos de Interface Ótica e Disparo dos IGBTs.....	360
4.3.2.2.2.1 Circuito de disparo (gate-driver) dos IGBTs.....	360
4.3.2.2.2.2 Circuito de interface por fibras ópticas	367
4.3.2.2.3 Idealização do sistema como um todo	370
4.3.2.2.4 Entrada DC dos conversores série	379
4.3.2.2.4.1 Entrada DC por retificador a diodos	379
4.3.2.2.4.2 Entrada DC por retificador ativo MMC shunt.....	380
4.3.2.2.5 Teste da comunicação por fibra óptica.....	382
4.3.2.2.6 Teste dos gate-drivers.....	385
4.3.2.2.7 Kit FPGA	390
4.3.2.2.8 Kit DSP	404
4.3.2.3 Projeto, Montagem e Testes das Placas.....	410
4.3.2.3.1 Placa de interface GPIO - fibras ópticas	410
4.3.2.3.2 Projeto CAD da placa de interface ótica	413
4.3.2.3.3 Placa de interface óptica finalizada e testes	414
4.3.2.3.4 Placa de submódulo (SM) em meia ponte	422
4.3.2.3.5 Projeto CAD da placa SM	427
4.3.2.3.6 Placa SM finalizada e testes	429
4.3.2.3.6.1 Teste em configuração ponte H.....	435
4.3.2.3.6.2 Teste em configuração ponte trifásica.....	439
4.3.2.3.6.3 Teste em configuração multinível pontes H em cascata (CHB)...	441
4.3.2.3.6.4 Teste em configuração multinível MMC.....	444
4.3.2.3.7 Placa do conversor de autoalimentação dos SMs	448
4.3.2.3.8 Projeto CAD de auto alimentação	449
4.3.2.3.9 Placa de autoalimentação finalizada	450
4.3.2.3.10 Placa sensor Hall de baixa tensão	451
4.3.2.3.11 Projeto CAD da placa LV2-P	453
4.3.2.3.12 Placa LV25-P finalizada	454
4.3.2.3.13 Placa condicionamento de sinais analógicos	454
4.3.2.3.13.1 Circuito do filtro passa baixas	455
4.3.2.3.13.2 Circuito para atenuação	456
4.3.2.3.13.3 Circuito para offset	456
4.3.2.3.13.4 Regulador de tensão para o último estágio.....	458

4.3.2.3.13.5 Projeto CAD da placa de condicionamento analógico (para quatro canais)	459
4.3.2.3.13.6 Placa de condicionamento analógico finalizada e testes.....	461
4.3.3 Sistema de Varreduras – FRA Online.....	466
4.3.3.1 Especificação das Placas	467
4.3.3.1.1 Circuitos integrados dedicados para varredura espectral	467
4.3.3.1.2 Circuitos integrados dedicados para geração de formas de ondas....	468
4.3.3.1.3 Conversores analógico-para-digital de alta velocidade	468
4.3.3.1.4 Kits de desenvolvimento para FPGAs contendo ADCs e DACs de alta velocidade	470
4.3.3.2 Descrição da Placa Escolhida.....	472
4.3.3.2.1 Informações técnicas do dispositivo.....	473
4.3.3.2.2 Conversor analógico-digital (ADC) de alta velocidade.....	476
4.3.3.2.3 Conversor digital-analógico (DAC) de alta velocidade.....	484
4.3.3.3 Desenvolvimento do Hardware.....	487
4.3.3.3.1 Sistema de geração de sinais	487
4.3.3.3.2 Sistema de aquisição de sinais	492
4.3.3.3.3 Sistema de geração e aquisição de sinais.....	502
4.3.3.3.4 Desenvolvimento do circuito de medição	504
4.3.3.4 Desenvolvimento do Software	507
4.3.3.4.1 Software servidor	507
4.3.3.4.2 Software cliente	508
4.3.3.5 Ensaio em Máquina de Indução	515
4.3.3.5.1 Espectros obtidos com a aplicação da técnica de FRA.....	515
4.3.3.5.2 Análise através de indicador estatístico.....	517
4.3.3.6 Ensaio em Máquina Síncrona	518
4.3.3.6.1 Espectros obtidos com a aplicação da técnica de FRA.....	519
4.3.3.6.2 Análise através de indicador estatístico.....	520
4.4 CONFECÇÃO E MONTAGEM FINAL DAS PLACAS DO PROTÓTIPO	521
4.4.1 Placas analógicas.....	522
4.4.1.1 Placa analógica single-ended.....	524
4.4.2 Placas de acionamento óptico.....	526
4.4.2.1 Placa de acionamento óptico - lado da eletrônica (2i+2o).....	526
4.4.2.2 Placa de acionamento óptico - lado da potência (relé).....	530
4.4.3 Placa de interface óptica (conexão com SMs)	533
4.4.4 Placa Mãe	535
4.4.4.1 Conexão das placas analógicas ao DSP	535
4.4.4.2 Conexão das placas de interface óptica ao DSP.....	537
4.4.4.3 Conexão das placas de interface óptica ao FPGA e comunicação entre DSP e FPGA	538
4.4.4.4 Conexão das placas de acionamento óptico ao DSP.....	541
4.4.4.5 Projeto CAD da placa mãe	543
4.5 SOFTWARE FINAL DE ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	550
4.5.1 Interface do Sistema Desenvolvido com o Usuário	553
4.5.1.1 Tela de aquisições.....	554
4.5.1.2 Tela de análises estatísticas	557
4.5.1.3 Tela de sinais no tempo.....	559

4.5.1.4	Tela de agendamento.....	560
4.5.1.5	Tela de inicialização do servidor	561
4.5.2	Projeto do Banco de Dados Desenvolvido.....	562
4.5.3	Protocolo de Comunicação Desenvolvido.....	570
4.5.3.1	Função para configurar a geração de sinais	573
4.5.3.2	Função para iniciar a geração de sinais	574
4.5.3.3	Função desativar a geração de sinais	575
4.5.3.4	Função para configurar e iniciar a aquisição de sinais.....	575
4.5.3.5	Função para salvar as aquisições no servidor.....	577
4.5.3.6	Função para transferir os dados salvos no servidor	577
4.5.4	Algoritmo de Varreduras Desenvolvido.....	579
4.6	CRIAÇÃO E MONTAGEM DO LABORATÓRIO DE TESTES DE MÉDIA TENSÃO PARA MÁQUINAS ELÉTRICAS	581
4.6.1	Projeto da subestação de média tensão	582
4.6.2	Visão final do laboratório de média tensão	584
5	APLICABILIDADE DO PROJETO.....	586
5.1	ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO	586
5.2	TESTES DE FUNCIONALIDADE.....	587
5.2.1	Simulações computacionais	587
5.2.2	Testes Controlados em Laboratório de Modelo Reduzido	587
5.2.2.1	Validação do Software Desenvolvido	587
5.2.2.1.1	Ensaio em Máquina de Indução	588
5.2.2.1.1.1	Configurações de teste	588
5.2.2.1.1.2	Tela de sinais no tempo	589
5.2.2.1.1.3	Tela de aquisições.....	591
5.2.2.1.1.4	Tela de análises estatísticas	593
5.2.2.1.2	Ensaio em Máquina Síncrona	599
5.2.2.1.2.1	Configurações de teste	599
5.2.2.1.2.2	Tela de análises estatísticas	600
5.2.2.2	Validação do Protótipo.....	601
5.2.2.2.1	Influência da posição do rotor nas varreduras.....	601
5.2.2.2.2	Influência da temperatura e da umidade nas varreduras.....	617
5.2.2.2.3	Uso de técnicas estatísticas para minimizar subjetividade nas análises...	619
5.2.2.2.4	Comparação dos indicadores estatísticos	628
5.2.3	Testes no Produto Mínimo Viável	653
5.2.3.1	Testes da placa mãe com o FPGA snickerdoodle e placas de interface óptica.....	653
5.2.3.2	Testes da placa mãe com o DSP e placas single-ended e placas de acionamento óptico	670
5.2.3.2.1	Teste das placas Single-Ended pela placa mãe.....	670
5.2.3.2.2	Teste das placas de acionamento óptico pela placa mãe.....	672
5.2.3.3	Teste das conexões SPI entre DSP e FPGA pela placa mãe	677
5.2.3.3.1	SPI-A (do DSP) recebe comandos do FPGA e envia status de flags ..	678
5.2.3.3.2	SPI-C (do DSP) envia índices de modulação para o FPGA e recebe status de erros.....	682
5.2.3.4	Teste em Média Tensão.....	693

5.2.3.4.1	Estimativa de queda de tensão sobre as indutâncias	693
5.2.3.4.2	Preparação para os testes em média tensão	695
5.2.3.4.3	Teste do conversor autoalimentado.....	697
5.2.3.4.4	Operação do conversor em média tensão	707
5.2.3.4.5	Verificação dos TPs de medição	713
5.2.3.4.6	Bloqueio de média tensão.....	718
5.2.3.5	Melhorias Produzidas após os Testes no Produto Mínimo Viável.....	718
5.2.3.5.1	Implementação das melhorias para redução dos pontos de maior aquecimento do hardware	718
5.2.3.5.2	Implementação de proteção contra perda de sincronismo.....	720
5.2.3.5.3	Implementação de segunda interface DSP-FPGA para o acionamento remoto dos contadores	722
5.2.3.5.3.1	Definição do protocolo de transferência de dados.....	724
5.2.3.5.3.2	Implementação do protocolo de transferência de dados.....	727
5.2.3.5.3.3	Testes do protocolo de transferência de dados.....	740
5.2.4	Testes em Campo.....	743
6	RELEVÂNCIA	758
6.1	CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS ECONÔMICOS	758
6.1.1	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Produtividade	758
6.1.2	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Qualidade do Fornecimento	760
6.1.3	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Gestão de Ativos.....	761
6.1.4	Contribuições e Impactos Econômicos ligados ao Mercado de Energia	761
6.1.5	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Eficiência Energética	762
6.2	CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS TECNOLÓGICOS	763
6.2.1	Contribuições e Impactos Tecnológicos relacionados à Infraestrutura Laboratorial.....	763
6.2.1.1	Apresentação do Laboratório de Média Tensão criado neste Projeto	764
6.2.1.1.1	Transformadores 220/√3: 4160/√3.....	769
6.2.1.1.2	Transformadores de Potencial (TP).....	773
6.2.1.2	Montagem do Laboratório	776
6.2.2	Contribuições e Impactos Tecnológicos relacionados à Propriedade Industrial	780
6.2.2.1	Pedido de Patente 1	780
6.2.2.2	Pedido de Patente 2	789
6.2.3	Contribuições e Impactos Tecnológicos relacionados à Transferência de Conhecimento e à Capacitação Técnica e Tecnológica.....	796
6.3	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	797
6.3.1	Contribuições Científicas relacionadas à Técnica Desenvolvida.....	797
6.3.2	Contribuições Científicas relacionadas à Produção Técnico-Científica.....	809
6.3.3	Contribuições Científicas relacionadas à Titulação em Programas de Pós-Graduação	812
6.4	CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS.....	813
6.4.1	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas aos Riscos e Impactos Ambientais	814

6.4.2	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas aos Riscos e Impactos Sociais	814
6.4.3	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas ao Desenvolvimento de Novas Atividades Socioeconômicas	815
6.4.4	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas aos Benefícios para a Sociedade	816
7	RAZOABILIDADE DOS CUSTOS.....	818
7.1	ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	818
7.2	ANÁLISE PRELIMINAR DE MERCADO	821
8	CONCLUSÕES.....	825
9	ANEXOS.....	829
9.1	PEDIDO DE PATENTE BR102020019156-0 (EXTRATO)	830
9.2	PEDIDO DE PATENTE BR102020019149-7 (EXTRATO)	844
9.3	SLIDES DO SEGUNDO PROCESSO FORMAL DE TRANSFERÊNCIA TECNOLÓGICA.....	856
9.4	ARTIGO – IEEE ACCESS	890
9.5	ARTIGO - REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA	909
9.6	ARTIGO - 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEM APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS	919
9.7	DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PÁGINAS INICIAIS	926