



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/11
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

NOVAS TÉCNICAS DE PROTEÇÃO APLICADAS AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA INTEGRADA.

DENYS LELLYS (*)
ALSTOM GRID Brasil

PAULO SIMÕES
CHESF

HUGO SALVADOR
CHESF

GUSTAVO ARRUDA
CHESF

ROBERTO DIAS
CHESF

RESUMO

Este artigo tem como finalidade apresentar uma nova técnica de proteção diferencial de linha, através de diferencial de corrente rápida ("subcycle differential protection"), como também, apresentar os modelos de geradores eólicos e a análise do comportamento transitório dos geradores eólicos durante curto circuito trifásico e o impacto na aplicação, desempenho e operação dos relés de proteção.

Finalmente, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados no RTDS para verificação do desempenho do sistema de proteção de distância e diferencial de linha tradicional (87L) que conectará 03 parques eólicos da Brasventos a subestação de Açú II da CHESF em 230 kV.

PALAVRAS-CHAVE

Comunicação, Diferencial, Eólica, Proteção, RTDS.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o governo brasileiro, através da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) tem incentivado e promovido leilões para construção e instalação de novos empreendimentos de geração de energia elétrica, em especial através de fontes alternativas (biomassa, eólica, térmicas, etc.). No caso específico da geração eólica, o montante de geração integrada ao sistema elétrico nacional atual é de 1,5 GW. O principal objetivo desta política é a diversificação da matriz energética cuja previsão é de que até 2022 as fontes alternativas sejam responsáveis por até 10% da matriz energética, algo em torno de 15 GW. Estima-se que o potencial para geração de energia através de eólicas seja da ordem de 350 GW, na hipótese de plena utilização dos potenciais.

Para conexão e integração deste montante de energia ao sistema interligado nacional, em especial da geração eólica, diversos estudos de sistemas (fluxo de cargas, curto circuito, etc.) são exigidos pela ANEEL, entretanto no tocante a parte de proteção e controle não é feito nenhum estudo prévio para avaliação e verificação do impacto destas novas fontes sobre o sistema de proteção existente. Como alternativa, a CHESF tem sistematicamente solicitado aos empreendedores a realização de ensaios no RTDS (real time digital simulator) para verificação e validação da performance da proteção. Como exemplo, será apresentado no item 4 deste artigo, resultados da simulação realizada no sistema de proteção diferencial (87L) que protegerá a linha de transmissão de 230 kV entre a CHESF e os 03 (três) parques eólicos da Brasventos (produtor independente).

Neste contexto, para compreensão e análise do tema, será apresentado também o estado da arte da tecnologia dos principais geradores eólicos existentes no mercado e o comportamento destes equipamentos sob condições de curto-circuito e o impacto sobre os sistemas de proteção da rede em operação.

2.0 - MODELOS DE GERADORES EÓLICOS

Cerca de 90% de toda energia comercializada nos leilões de energia eólica de 2009 a 2010 promovidos pela ANEEL já foi instalada ou está em processo de instalação na faixa litorânea do Nordeste devido à grande abundância de ventos nestas regiões para geração de energia através desta fonte alternativa. A entrada em operação e integração deste volume de energia, distribuída em diversos pontos do sistema vai demandar um reforço na rede de transmissão para escoar toda esta energia gerada (novas linhas, novas subestações coletoras, etc.), além de impactar na necessidade de estudos de adequações dos sistemas de proteção em operação, devido às diversas tecnologias de geradores eólicos atualmente existentes no mercado.

Neste contexto, para compreensão e análise do tema, serão apresentados a seguir o estado da arte da tecnologia dos principais geradores eólicos existentes no mercado e o comportamento destes equipamentos sob condições de curto-circuito e o impacto sobre os sistemas de proteção da rede de distribuição em operação.

Os gráficos abaixo apresentam os modelos de geradores eólicos sob condição de curto circuito trifásico nos terminais do gerador:

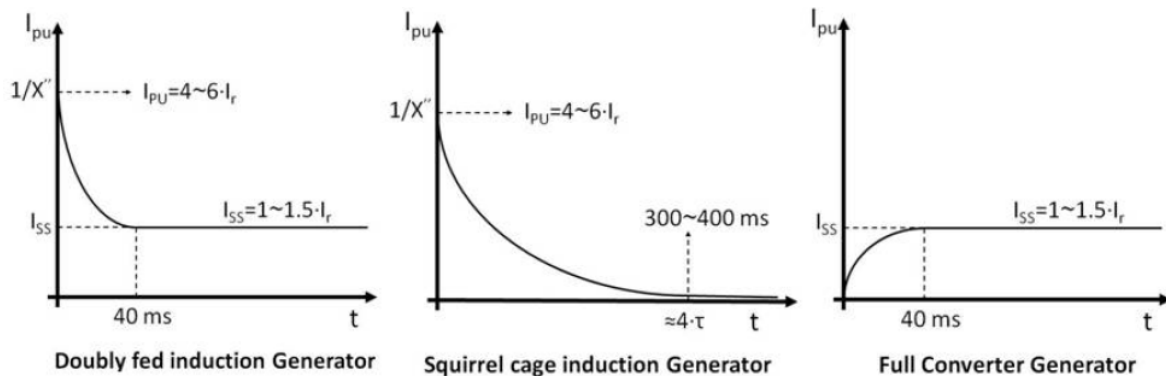


FIGURA 1 – Comportamento dos geradores eólicos

Tomando como base a curva de cada tipo de gerador eólico mostrado da figura 1, é apresentado a seguir análise do comportamento transitório durante o curto circuito:

- Gerador eólico de indução tipo dupla alimentação - DFIG:

De acordo com a figura 1 ("doubly fed induction generator - DFIG") a resposta transitória do gerador eólico de indução de dupla alimentação é o rápido decaimento da corrente de curto ($4 \sim 6 \times I_r$ - corrente operativa em PU) para o valor de regime (I_{ss}) equivalente a 1 a 1,5 da corrente operativa em 40ms. Após este tempo, o gerador comporta-se como uma fonte ideal de corrente que supre corrente balanceada trifásica continuamente com valor $1 \sim 1,5 \cdot I_r$.

- Gerador eólico de indução clássico tipo gaiola de esquilo:

Conforme a figura 1 ("squirrel cage induction generator") a resposta transitória do gerador eólico tipo gaiola de esquilo é o decaimento da corrente de curto ($4 \sim 6 \times I_r$ em PU) para uma corrente praticamente nula em até 300 a 400ms a partir do instante inicial do curto.

Este tipo de gerador normalmente é conectado diretamente a rede e considerando a legislação atual não é permitido este tipo de conexão no Brasil, além do que, este tipo de gerador não se comporta como uma fonte ideal de corrente.

- Gerador eólico síncrono tipo full converter:

De acordo com a figura 1 (*“full converter generator”*) ocorre uma elevação da corrente de pré-falta para uma corrente de curto em regime (I_{ss}), limitada ao valor de 1 a 1,5 a corrente nominal (I_r) do gerador, após 40 ms do instante inicial do curto.

O gerador eólico tipo full converter é capaz de manter a corrente de curto mínima em regime com a tensão de curto na ordem de 25% da tensão nominal do sistema.

Neste cenário, podemos observar que o comportamento transitório e a contribuição de curto circuito destes geradores são distintos dos tradicionais geradores hidráulicos e térmicos e cuidados adicionais devem ser tomada na aplicação, definição dos ajustes e operação dos relés de proteção para o correto desempenho destes dispositivos, conforme recomendações a seguir:

- Os relés de distância (ANSI 21) requerem valor mínimo de corrente para operarem e pode-se afirmar que geradores de dupla alimentação (DFIG) e gaiola de esquilo permitem a operação correta da zona 1 (instantânea) devido ao alto valor da corrente no instante inicial, entretanto, para geradores tipo *“full converter”* este valor pode não ser suficiente e a proteção não operar.
- Por outro lado, para qualquer tipo de gerador, dentre os modelos da figura 1, pode-se afirmar que os relés diferenciais de linha (ANSI 87L) protegem e operam corretamente, embora cuidados adicionais deve ser tomado no cálculo dos ajustes da unidade diferencial para correta sensibilização da curva de operação (corrente de restrição x corrente de operação) desta unidade.
- Para geradores tipo dupla alimentação (DFIG) e *“full converter”*, pode-se afirmar que sistemas de proteção através de relés de sobrecorrente de fases temporizados (ANSI 50/51) não são adequados devido a baixa contribuição de corrente de curto-circuito ($I_{ss} = 1 \text{ a } 1,5 \times I_r$), após 40ms do instante inicial do curto. Para geradores tipo gaiola de esquilo, embora a corrente se mantenha por 300 a 400ms, provavelmente ocorrerá a partida e depois o *“reset”* e o relé não irá operar corretamente.

3.0 - PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHA DE ALTA VELOCIDADE – “SUBCYCLE LINE DIFFERENTIAL PROTECTION”

O princípio de funcionamento da proteção diferencial se baseia na aplicação da lei de Kirchhoff ou lei das correntes cuja soma das correntes que entram e saem do nó é igual a zero para linha sem falta e diferente de zero para falta interna, sendo necessário canal de comunicação óptico direto ou multiplexado para realizar a troca constante de mensagens entre os relés, contendo principalmente nestas mensagens os fasores de correntes medidos em ambos os terminais de linha.

A proteção diferencial de linha é atualmente um dos métodos mais recomendados para proteção da linha de transmissão que conecta parques eólicos ao sistema de potência, em especial para o caso de linha curtas e também à imunidade deste método de proteção ao fenômeno de *“power swing”*, efeito da compensação série, altíssima sensibilidade para faltas com alta impedância e seletividade, entre outros fatores.

O tempo típico de operação dos tradicionais relés diferenciais de linha em operação é da ordem de 1,5 a 2,0 ciclos, como também a velocidade de comunicação direta é de 56/64 Kbps, entretanto, com a finalidade de diminuir o tempo de atuação desta proteção, e por consequência rápida eliminação da falta e desconexão da linha de transmissão que conecta a geração e o sistema de potência, foi desenvolvido um novo método de medição e processamento do sinal digital com redução do tempo de filtragem (01 ciclo para $\frac{1}{2}$ ciclo), associado ao aumento da velocidade de comunicação entre os relés (128 Kbps) permitindo alcançar tempo de operação inferior a 01 (um) ciclo.

De acordo com a figura 2, o processamento do sinal possui 02 ramos, sendo o primeiro ramo a filtragem rápida de Fourier de $\frac{1}{2}$ ciclo e segundo ramo a filtragem lenta de 01 ciclo. O chaveamento automático do processamento ocorrerá em função da detecção da presença de ruídos no sinal de entrada visando garantir a segurança e estabilidade do sistema de proteção. Na frequência de 60 HZ os tempos de filtragem serão 8,33ms e 16,66ms.

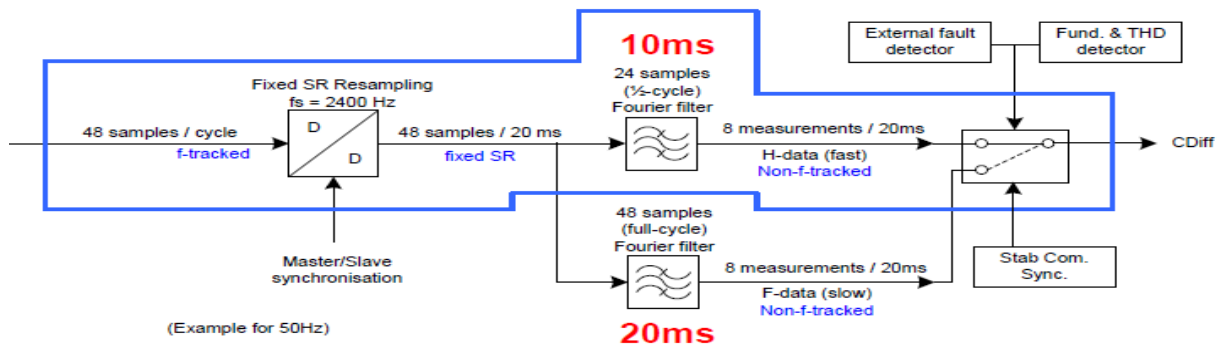


Figura 2 – Processamento sinal digital 1/2 ciclo (50Hz)

A figura 3 a seguir, apresenta o esquema simplificado do sistema de comunicação diferencial de alta velocidade com taxa de transmissão de 128 Kbps (“subcycle communication protection”). Para este esquema é utilizada comunicação direta relé-relé e não é necessário o uso de GPS.



Figura 3 – Esquema de comunicação diferencial

Para execução da sincronização automática das amostras de corrente e execução do algoritmo diferencial de corrente rápida é necessário medir com precisão e compensar o tempo de atraso ocasionado pelo canal de comunicação (128 Kbps). Para este sistema de proteção, é usada a técnica de medição contínua do tempo de atraso de propagação e compensação deste atraso para sincronizar as amostras de correntes na mesma base de tempo.

Este esquema de proteção tem aplicação principalmente em sistemas de potência de alta (230 a 500 KV) e extra alta tensão (750 a 1000 KV), onde o tempo total de eliminação de faltas requerido seja inferior a 100ms, garantindo a manutenção da estabilidade e menor “stress” possível dos equipamentos do sistema, como por exemplo, em conexões entre usinas hidroelétricas e subestações elevadoras ou centrais geradoras (eólicas ou térmicas) e subestações coletoras do sistema de potência.

4.0 - TESTE DE MODELO (RTDS) – CONEXÃO EM 230 KV DA CENTRAL GERADORA EÓLICA BRASVENTOS E O SISTEMA CHESF

A simulação foi realizada no simulador em tempo real (RTDS) do fabricante ALSTOM U.K. e teve como objetivo principal comprovar o correto desempenho do sistema de proteção diferencial de linha (87L) e da proteção de distância (21), que protegerá a linha de transmissão de 230 KV que conectará 03 parques eólicos da Brasventos e a subestação de Açú II da CHESF.

Os parques eólicos do empreendedor *Brasventos*, a ser instalado no estado do Rio Grande do Norte, serão compostos por três parques independentes denominados de Miassaba III (68,47 MW), Reis dos ventos I (58,45 MW) e Reis dos ventos III (60,12 MW) com potência total de 187,04 MW e 112 aerogeradores modelo ALSTOM ECO86-1,67 MW, conforme figura 4 abaixo:

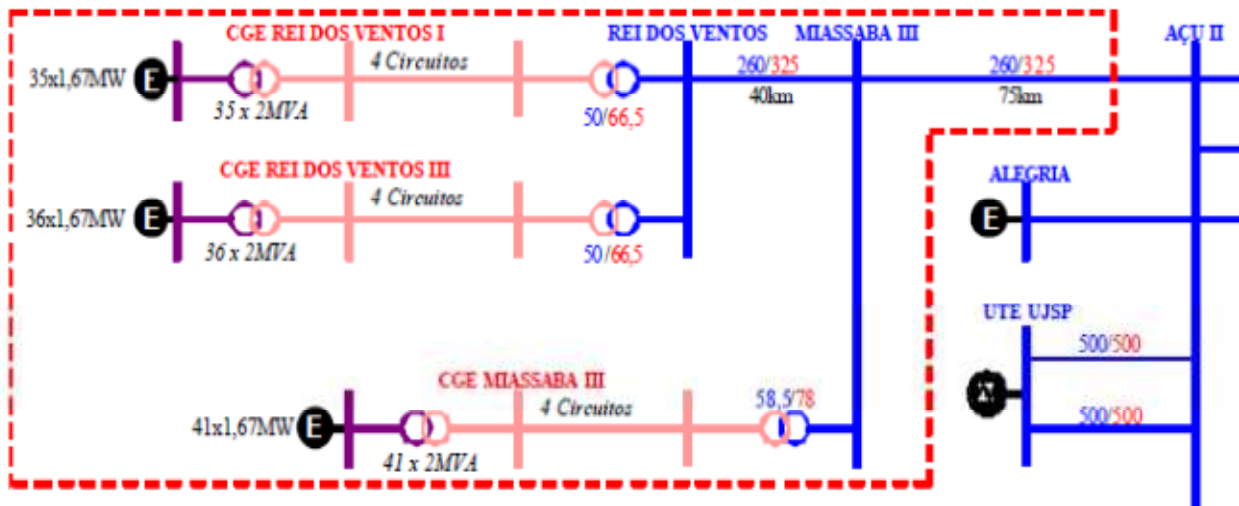


Figura 4 – Central Geradora Eólica Brasventos

O destaque desta simulação foi a precisa modelagem no RTDS dos geradores eólicos modelo ALSTOM ECO86 (tipo **Dobly feed induction – DFI**), cujos modelos de geradores não são normalmente disponibilizados pelos fabricantes para realização dos estudos de sistema (regime permanente e dinâmico).

Ressalta-se que as máquinas tipo DFIG têm como característica o rápido decaimento da corrente de curto circuito conforme apresentado na figura 5, onde podemos observar que no instante do curto a corrente de pico atinge 3,4 PU (base da máquina) e decaimento muito rápido ($\Delta t = 0,2 - 0,23 = 0,03s$).

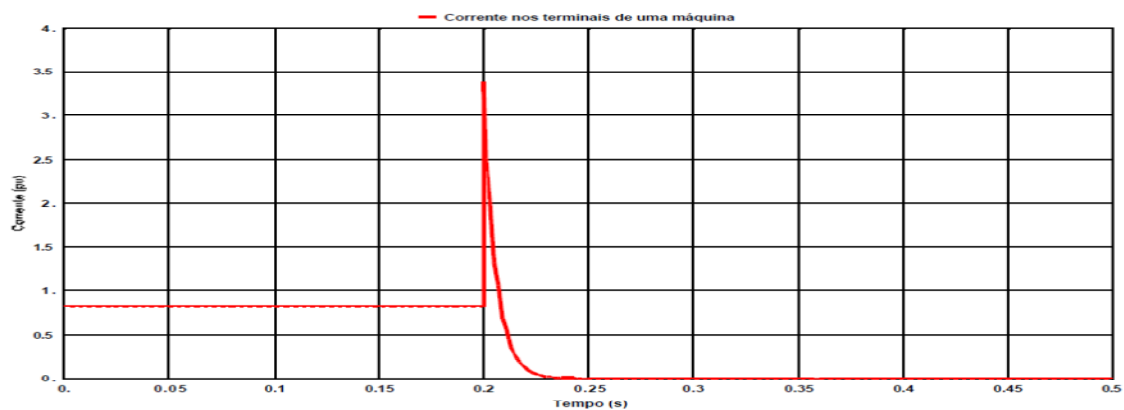


Figura 5 - Corrente de curto circuito de uma máquina DFIG - ECO86

4.1 Circuito de testes

A conexão destes parques eólicos da Brasventos ao sistema interligado nacional (SIN) será através de uma linha de transmissão de 230 kV com extensão de 75 Km até a subestação de Açu II da CHESF.

Para a simulação e modelagem no RTDS do sistema de potência, foi adotado o circuito de teste da figura 6 abaixo, representando parte do regional Norte da CHESF e os parques eólicos da Brasventos.

Os relés de proteção multifuncionais, modelo P545, foram conectados ao simulador em ambos os terminais da linha de transmissão de 230 kV (LT 04xx). As funções de distância (21), direcional de neutro (67N) e diferencial de corrente (87L) foram habilitadas e funcionaram em paralelo para eliminarem qualquer tipo de falta.

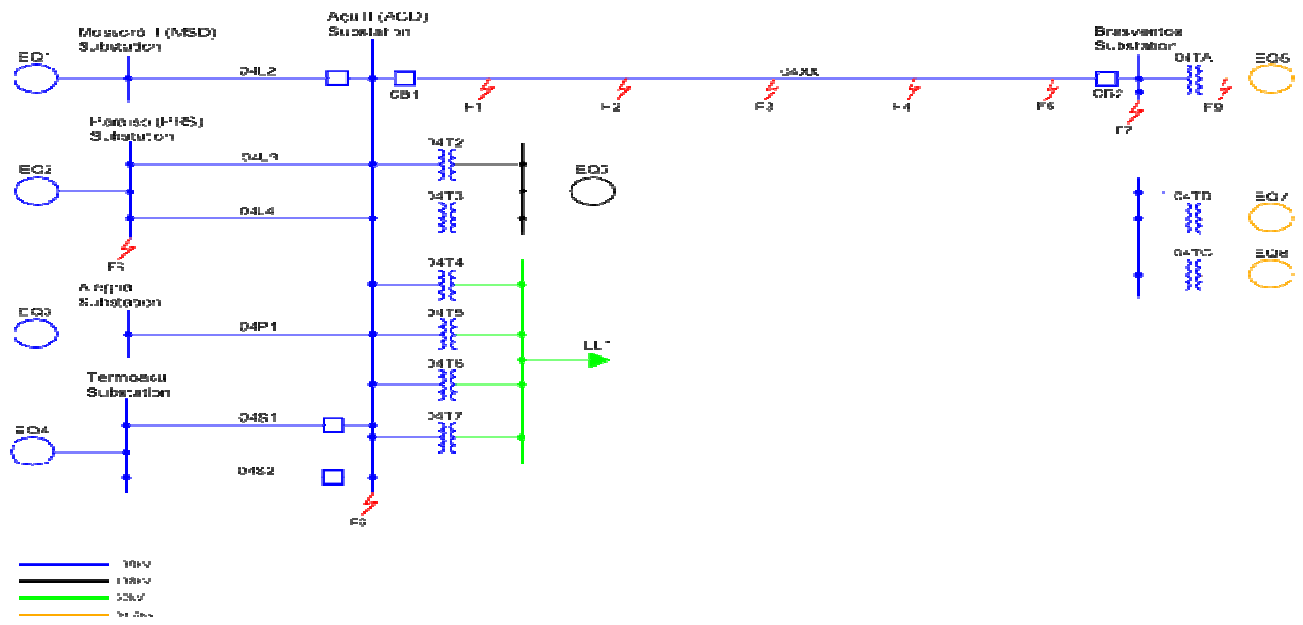


Figura 6 – Circuito de testes

4.2 Resultados dos Testes

Foram simulados 370 casos de faltas (monofásica, bifásica e trifásica) em pontos pré-definidos do sistema, considerando tanto faltas interna na linha de transmissão (F1-0%, F2-25%, F3-50%, F4-75%, F5-100%), quanto faltas externas (F6, F7, F8 e F9) e impedância de faltas variando de 0,01, 10, 20 e 100 Ohms e condição de carga máxima e mínima.

Nos itens a seguir será apresentada a análise geral do desempenho das proteções para as faltas internas e externas aplicadas no sistema de potência da figura 6:

➤ Faltas Internas:

O terminal da SE Açú II da CHESF, foi comprovadamente o terminal de fonte forte, ou seja, geração forte e alta contribuição de corrente de curto circuito até a abertura do disjuntor (CB1) e a rápida eliminação das faltas, permitindo desempenho adequado da proteção.

Observamos ainda que para faltas na saída deste terminal (frontal ao relé – ponto F1), as faltas dentro do alcance da zona 1 foram eliminadas com tempo inferior ao da unidade diferencial de corrente, ou seja, a unidade de distância atuava mais rápido com tempo em torno de 17ms e a unidade diferencial em torno de 25ms. À medida que o ponto da falta afastava-se do terminal da SE Açú II (25%, 50%, 75% e 100%), as faltas foram eliminadas através da unidade diferencial com o tempo uniforme médio de 25ms, embora a unidade de distância tenha apresentado comportamento intermitente e tempo de operação crescente.

Enquanto que o terminal dos parques eólicos Brasventos, pela característica das máquinas DFIG, conforme já explicado no início deste item, apresentou decaimento muito rápido da corrente de curto (vide figura 7), desta forma, a unidade de distância não operou para a maioria das faltas enquanto que a unidade diferencial operou corretamente para todas as faltas com tempo médio de 25,5ms.

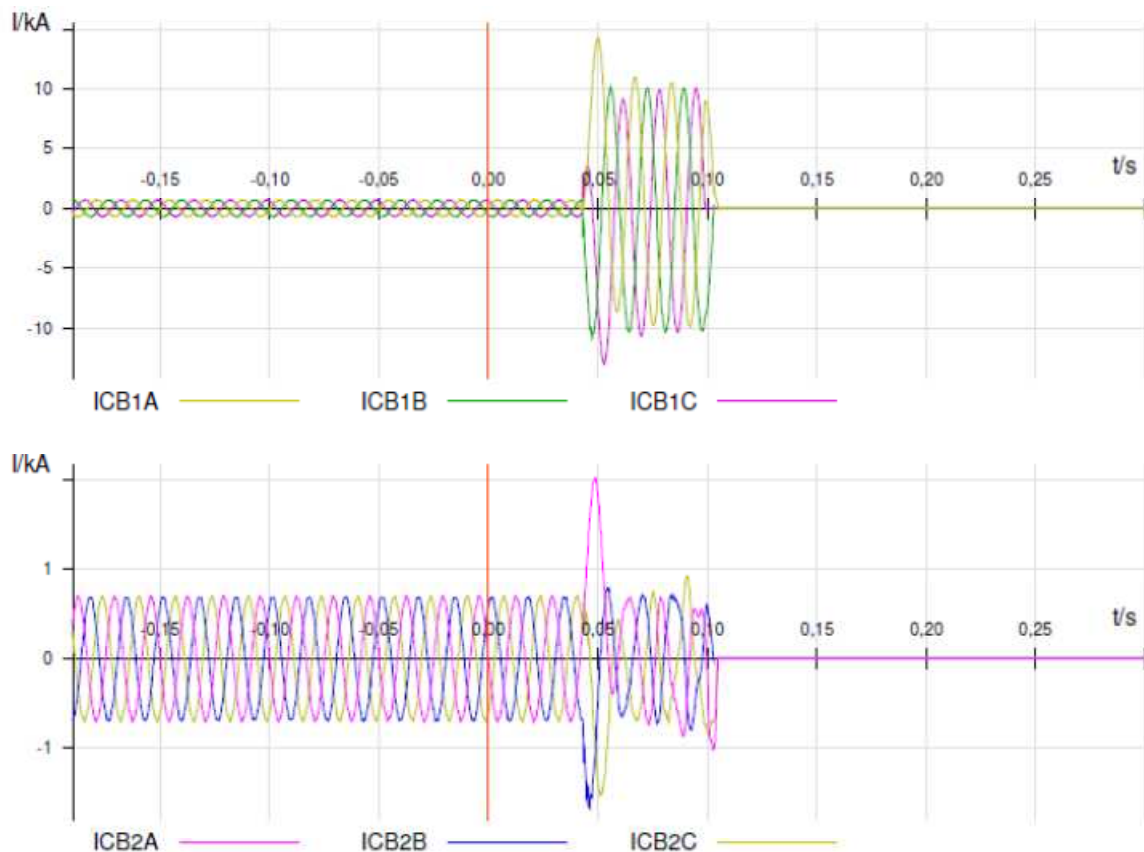


Figura 7 – Registro das contribuições de correntes do terminal CHESF (ICB1) e Brasventos (ICB2)

Este comportamento confirma que parques eólicos com máquinas DFIG, conectadas ao sistema de potência, deve ser aplicada a proteção diferencial de corrente e a proteção de distância como função de back-up ou retaguarda.

➤ Faltas externas:

Os relés de ambos os terminais da linha de transmissão permaneceram estáveis (não operação) para as faltas externas aplicadas em diversas barras nos pontos pré-selecionados (F6, F7, F8 e F9) da figura 6.

5.0 - CONCLUSÃO

É imprescindível o estudo de aplicação para verificação do comportamento de uma proteção de linha de transmissão de alta e extra alta tensão com a integração de novas fontes de geração (eólica, térmica, hidráulica, etc), em especial com a evolução das modernas técnicas digitais no campo das proteções diferenciais de linha, permitindo redução do tempo de operação e a desconexão de blocos de geração com menor impacto possível na estabilidade do sistema.

Novas técnicas de proteção diferencial de corrente rápida, com tempo de operação inferior a 01 ciclo e canal de comunicação de 128Kbps, tem sido aplicadas nas linhas de transmissão, tornando-se a preferida das empresas devido a rápida eliminação das faltas e solução de problemas já conhecidos e relatados tais como efeito da compensação série, faltas com alta impedância e oscilação de potência nos sistemas elétricos de potência.

Os testes de modelo executados no simulador em tempo real (RTDS) para aferição das proteções que protegerão a linha de transmissão de 230 KV que conectará o parque eólico Brasventos e a subestação de Açú II da CHESF apresentaram resultados satisfatórios e operação correta tanto para faltas internas quanto para as faltas externas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Network Protection Application Guide, NPAG – ALSTOM GRID, 2011;
- [2] Differential Protection Relay – Technical Manual ALSTOM;
- [3] Estudos para Integração das CGE Miassaba III, Reis dos ventos I/III – Relatório ANDESA RT-05-10-11.
- [4] P545 Numerical current differential line protection – Dynamic testesfor Brasventos wind farm and CHESF.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Denys Lellys

Nascido em Campina Grande, PB, em 26 de Junho de 1958.

Graduação (1981) na UFPB-PB e Pós-Graduação (1983) em Engenharia Elétrica: UFPB-PB

Empresa: ALSTOM desde 2000

Engenheiro de Aplicação e Vendas.

Paulo Simões

Nascido em Juazeiro, BA, em 15 de Novembro de 1970.

Graduação (1994) na UFPE em Engenharia Elétrica, com Especialização (2005) em Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência na Universidade de São Paulo e Especialização (2009) em Proteção de Linhas de Transmissão e Subestações na Universidade Federal de Santa Catarina.

Empresa: CHESF desde 2002

Gerente da Divisão de Engenharia de Controle de Processos e Proteção de Subestações - DEEC.

Hugo Salvador

Nascido em Caruaru, PE, em 22 de Janeiro de 1979.

Graduação (2002) na UPE em Engenharia Elétrica

Empresa: CHESF desde 2003

Engenheiro Eletricista.

Gustavo Arruda

Nascido em Recife, PE

Graduação na UFPE em Engenharia Elétrica

Empresa: CHESF

Gerente da Divisão de Operação da Proteção e Regulação - DOPR.

Roberto Dias

Nascido em Recife, PE.

Graduação na UFPE em Engenharia Elétrica

Empresa: CHESF

Engenheiro da DOPR.