



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Avaliação do comportamento dinâmico de sistemas de geração distribuída

**Jorge Luiz Jacopetti e Silva¹, José Luiz Pereira da Silva², Robson Almir de Oliveira¹,
Robson C. K. de Oliveira², Suzana Mensch de Carvalho²**

¹**Centro de Engenharias e Ciências Exatas – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
(UNIOESTE)**

²**Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI)/Laboratório de Automação e
Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE)**

Foz do Iguaçu - Brasil

RESUMEN

Devido a rigorosidade em relação à eliminação de resíduos na natureza, a utilização de biodigestores tem se difundido no agronegócio do oeste do Paraná. A biomassa residual acumulada nos biodigestores produz gás metano, que pode ser utilizado como combustível para a geração de energia elétrica. A conexão de geração distribuída [1,2] mostra-se uma boa alternativa para o aproveitamento energético da biomassa. Entretanto, a concessionária de energia elétrica exige a realização de estudos que comprovem a viabilidade técnica da interligação de tais geradores ao seu sistema de distribuição [3], de forma que nenhuma condição de segurança seja violada. A principal preocupação das concessionárias é a capacidade de detecção, pelos sistemas de proteção dos geradores, de condições de operação anormal nas redes de distribuição bem como da perda da fonte de geração da concessionária. Em ambas situações o gerador deve ser desconectado do sistema para garantir a segurança física de equipes que estejam trabalhando na rede, e também evitar um fechamento de paralelo fora de fase, resultando em severos danos ao gerador. Um protótipo de geração distribuída foi implementado na Granja Colombari em São Miguel do Iguaçu, Oeste do Paraná, com a possibilidade de conexão em paralelo à rede de distribuição da COPEL. Este protótipo é composto por um grupo motor-gerador, e possuindo um painel de monitoramento, controle e proteção. Para permitir a operação em paralelo, a concessionária realizou, no início deste ano, diversos testes de campo. Neste artigo será mostrada a implementação computacional deste sistema utilizando o software ATP (*Alternative Transients Program*) [4], bem como a modelagem das funções básicas de proteção exigidas pela concessionária através da ferramenta MODELS do ATP [5].

PALABRAS CLAVES

Geração distribuída, Sistema de Distribuição, Comportamento Dinâmico, Proteção, Alternative Transients Program, Models.

Jorge Luiz Jacopetti e Silva – jorgejacopettisilva@gmail.com

1. SISTEMA DA GRANJA COLOMBARI

A Granja Colombari localiza-se no município de São Miguel do Iguaçú, região Oeste do estado do Paraná, e caracteriza-se pela criação de suínos, tendo aproximadamente 3.000 animais. Os excrementos dos animais são acumulados em uma lagoa, devidamente isolada do contato direto com o solo, coberta por uma lona e demais equipamentos que compõem os denominados biodigestores, utilizados para a produção do biogás que será convertido em energia elétrica.

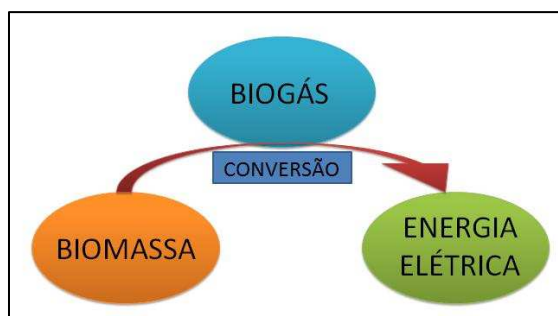


Figura 1: Processo de geração de energia elétrica a partir de biomassa

A seguir são apresentadas as especificações técnicas dos principais componentes do sistema de geração distribuída da Granja Colombari.

1.1 Motor – Máquina Primária

Utilizou-se, como máquina primária, um motor de carro adaptado para queima de gás metano, modelo VW AP-2000 com 4 cilindros.

1.2 Gerador Síncrono

Fabricante: Kcel Motores e Fios Ltda.

Potência nominal: 50kVA

Tensão nominal: 220/440-380 V

Fator de potência: 0,8

Número de pólos: 2

Resistência:

$$R_a = 0.0237 \text{ pu}$$

Reatâncias:

$$X_l = 0.01539 \text{ pu}$$

$$X_d = 1,293 \text{ pu}$$

$$X'_d = 0,106 \text{ pu}$$

$$X''_d = 0,0973 \text{ pu}$$

$$X_2 = 0,264 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0,0162 \text{ pu}$$

$$X_q = 0,728 \text{ pu}$$

$$X'_q = 0,431 \text{ pu}$$

Constantes de tempo:



$$T'_{d0} = 0,532s$$

$$T'_d = 0,044s$$

$$T_a = 0,016s$$

Constante de inércia do rotor do gerador: $0,204 \text{ kg.m}^2$

1.3 Painel de monitoramento, controle e proteção

O painel de monitoramento, controle e proteção foi fornecido pelo fabricante WOODWARD, contendo o controlador de grupos geradores modelo GCP-22 e o relé XG2, com as seguintes funções de proteção disponíveis:

- Sobretensão (59);
- Subtensão (27);
- Taxa de variação da frequência (81 taxa);
- Sobrefrequência (81 sobre);
- Subfrequência (81 sub);
- Sobrecorrente (51);
- Sobrecorrente de neutro através de cálculo interno (51 In);
- Salto de vetor (78).

Foram modeladas as funções de proteção 59, 27, 51, 78, 81 sobre e 81 subfrequência, todas de tempo definido.

1.4 Transformador

Potência nominal: 45kVA.

Relação de transformação: 33/0,22 kV.

Impedância: $0,019+j0,035 \text{ pu}$.

Conexão: estrela aterrada do lado de alta e do lado de baixa.

2. REQUISITOS EXIGIDOS PELA CONCESSIONÁRIA PARA O ACESSO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS

Todo gerador conectado em paralelo através de suprimento não exclusivo da concessionária deve cumprir os seguintes requisitos básicos [3]:

- Após o desligamento de um alimentador, o micro-gerador deve ser automaticamente desconectado da rede de distribuição, por suas próprias proteções antes do religamento do alimentador acontecer através de processos automáticos;
- O micro-gerador nunca deve energizar a rede da concessionária;
- O montante de energia fornecida pelo gerador para a concessionária não deve ser maior que 50% de sua própria carga. Entenda-se como carga própria o

montante de carga que, em caso de abertura do ramal alimentador, o gerador irá formar uma ilha.

Estes requisitos visam assegurar a segurança física dos técnicos da concessionária, que podem estar executando serviços de manutenção no sistema, e evitar danos ao gerador, pois, em casos de religamento, se o gerador não estiver operando isoladamente, poderá ocorrer o paralelismo com as tensões deste defasadas das tensões da rede de distribuição.

3. MONTAGEM DO SISTEMA EM ATP

Para a simulação do caso no ATP a barra da COPEL em Foz do Iguaçu foi considerada como barra de referência. O diagrama abaixo mostra a configuração do sistema implementado.

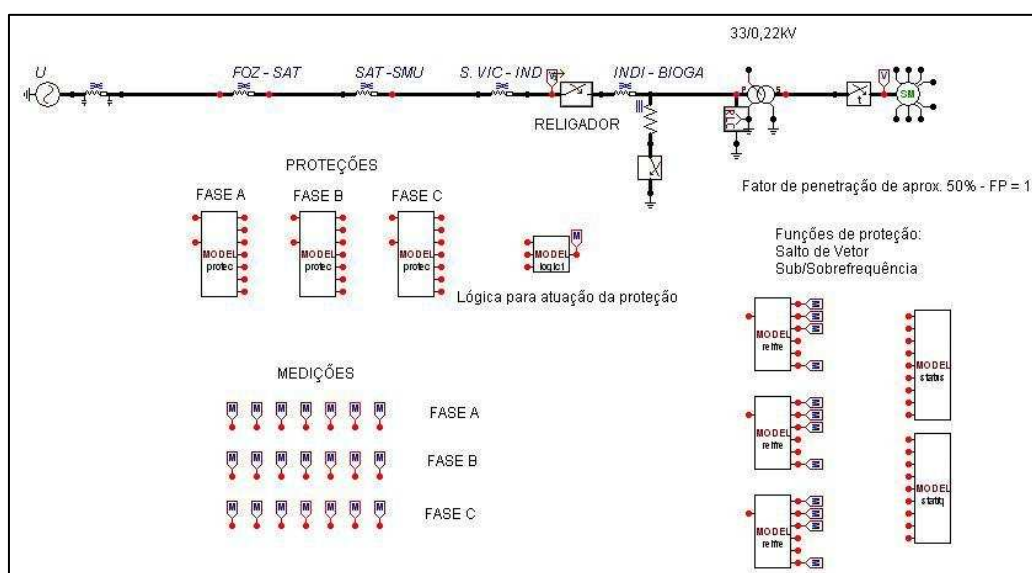


Figura 2: Sistema implementado em ATP

Os dados dos trechos das linhas de distribuição e o equivalente de curto-circuito foram obtidos diretamente com a concessionária.

A modelagem das funções de proteção de subtensão, sobretensão, sobrecorrente, salto de vetor e sub/sobrefrequência (todas elas de tempo definido) foi realizada utilizando a ferramenta MODELS do software ATP.

3.1 Premissas para a simulação

O objetivo principal deste trabalho é através da simulação avaliar a atuação ou não das funções de proteção implementadas. Tendo em vista o exposto tomam-se como premissas para o caso:

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

- a) O tempo de ajuste de todas as funções de proteção é de 60ms, exceto para as funções 81O/U que é de 20ms, conforme os ajustes feitos em campo durante os testes realizados pela concessionária, exceto para a função salto de vetor
- b) Sobretensão permitida de 110%.
- c) Subtensão permitida de 90%.
- d) Sobrecorrente permitida de 120%.
- e) Variação de frequência permitida da frequência nominal +/- 2Hz.
- f) Salto de vetor ajustado para 5°.
- g) Os valores de tensão e corrente utilizados para comparação primeiramente foram convertidos para valores em pu para as tensões e valor RMS para as correntes.
- h) O cálculo da frequência é feito com base na medida do período de um ciclo do sinal de tensão de cada fase após filtragem do sinal.
- i) A constante de inércia do motor foi desprezada.
- j) As faltas são aplicadas no instante 50ms e a abertura do religador se dá no instante 100ms.
- k) Os curto-circuitos não são eliminados após a abertura do religador.
- l) Não foi simulado o religamento automático.

3.2 Modelagem das funções de proteção utilizando a ferramenta MODELS do ATP

As funções implementadas foram: sobretensão (59), subtensão (27), sobrecorrente (51), salto de vetor (78), sub/sobrefrequência (81O/U). Os relés de tempo definido foram implementados de forma a possibilitar que o usuário configure o valor e o tempo máximo de *pick-up* limite permitido. O relé possui as seguintes características de funcionamento:

- Quando ocorrer um *pick-up* e o valor da variável retornar ao valor normal de operação não ocorre o sinal de trip e o temporizador é zerado, nos casos das função ser temporizada;
- Quando ocorrer um *pick-up* e o valor da variável não retornar ao valor normal de operação ao final do tempo, ocorre o sinal de trip;

4. CASOS SIMULADOS

Os casos simulados para avaliar o comportamento da proteção do gerador são mostrados abaixo na tabela 1.

Tabela 1: Cenários de operação do gerador

Nº	Descrição	Cenário	Ponto de aplicação
01	Curto-circuito monofásico	A	FOZ
02	Curto-circuito bifásico	A	FOZ
03	Curto-circuito bifásico à terra	A	FOZ
04	Curto-circuito trifásico à terra	A	FOZ
05	Abertura monofásica	A	FOZ
06	Abertura bifásica	A	FOZ
07	Abertura trifásica	A	FOZ
08	Curto-circuito monofásico	A	SMU

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

09	Curto-circuito bifásico	A	SMU
10	Curto-circuito bifásico à terra	A	SMU
11	Curto-circuito trifásico à terra	A	SMU
12	Abertura monofásica	A	SMU
13	Abertura bifásica	A	SMU
14	Abertura trifásica	A	SMU
15	Curto-circuito monofásico	A	LADO DE AT – GD
16	Curto-circuito bifásico	A	LADO DE AT – GD
17	Curto-circuito bifásico à terra	A	LADO DE AT – GD
18	Curto-circuito trifásico à terra	A	LADO DE AT – GD
19	Abertura monofásica	A	LADO DE AT – GD
20	Abertura bifásica	A	LADO DE AT – GD
21	Abertura trifásica	A	LADO DE AT – GD
22	Abertura monofásica	B	LADO DE AT – GD
23	Abertura bifásica	B	LADO DE AT – GD
24	Curto-circuito monofásico	B	LADO DE AT – GD
25	Curto-circuito bifásico à terra	B	LADO DE AT – GD
26	Abertura monofásica	C-1	LADO DE AT – GD
27	Abertura bifásica	C-1	LADO DE AT – GD
28	Curto-circuito monofásico	C-1	LADO DE AT – GD
29	Curto-circuito bifásico à terra	C-1	LADO DE AT – GD
30	Abertura monofásica	C-2	LADO DE AT – GD
31	Abertura bifásica	C-2	LADO DE AT – GD
32	Curto-circuito monofásico	C-2	LADO DE AT – GD
33	Curto-circuito bifásico à terra	C-2	LADO DE AT – GD
34	Abertura monofásica	D	LADO DE AT – GD
35	Abertura bifásica	D	LADO DE AT – GD
36	Curto-circuito monofásico	D	LADO DE AT – GD
37	Curto-circuito bifásico à terra	D	LADO DE AT – GD
38	Curto circuito monofásico com Rfalta = 25	A	LADO DE AT – GD
39	Curto circuito monofásico com Rfalta = 25	A	FOZ
40	Curto circuito monofásico com Rfalta = 25	D	LADO DE AT – GD
41	Curto circuito monofásico com Rfalta = 50	A	LADO DE AT – GD
42	Curto circuito monofásico com Rfalta = 100	A	LADO DE AT – GD

Legenda: A – Geração igual a 50% do montante de carga própria com FP=1.
 B – Geração igual a 100% do montante de carga própria com FP=1.
 C1 – Geração igual a 50% do montante de carga própria com FP=0,8 atrasado.
 C2 – Geração igual a 50% do montante de carga própria com FP=0,8 adiantado.
 D – Geração menor que 20% do montante de carga própria com FP=1.

5. RESULTADOS

Os resultados são mostrados abaixo através das figuras mostrando os sinais do gerador, de tensão e corrente, assim como os sinais de atuação da proteção correspondente. Os sinais de atuação da proteção foram multiplicados por um fator para melhor visualização. Quando estes sinais caem a zero é porque houve atuação da respectiva função de proteção.

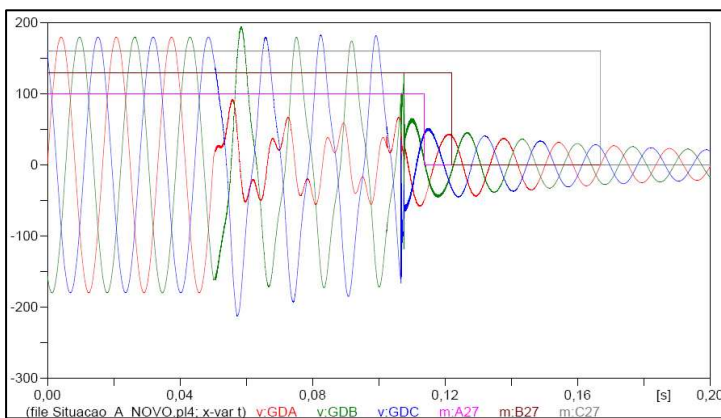


Figura 4: Caso 01 – Sinais monofásicos de tensão do gerador e de atuação da função subtensão (27) por fase.

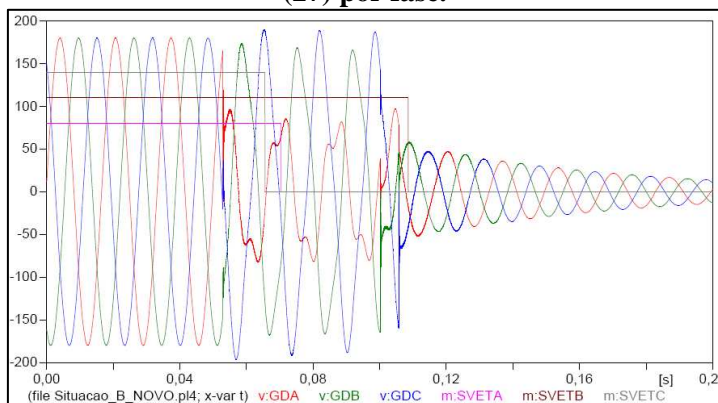


Figura 5: Caso 22 – Sinais monofásicos de tensão do gerador e de atuação da função salto de vetor (78) por fase.

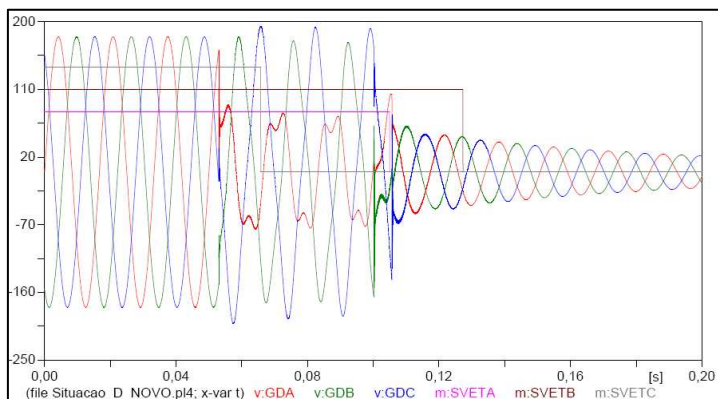


Figura 6: Caso 34 – Sinais monofásicos de tensão do gerador e de atuação da função salto de vetor (78) por fase.

6. CONCLUSÕES

As simulações mostraram que o esquema básico de funções de proteção atende aos requisitos exigidos pela concessionária para desconexão do micro-gerador em caso de defeito no alimentador antes de ocorrer o religamento.



A proteção que obteve melhor desempenho foi a função salto de vetor (78), salvo quando o gerador está a vazio ou com montante de geração igual ao montante de carga própria, neste caso então ao ocorrer um defeito o relé pode não detectar o salto de vetor e como consequência pode atuar em um tempo maior ou nem mesmo atuar, porém tendo em vista que a concessionária exige que o montante de geração seja menor que 50% da carga própria, esta situação de não atuação ou atuação tardia é evitada. As demais funções atuam como *back-up* da função 78.

Comparando as figuras 5 e 6 pode-se observar o tempo maior para atuação da função salto de vetor dada a condição do gerador na figura 7 estar gerando potência inferior a 20% da carga própria, pode-se perceber um tempo maior nos sinais de atuação da função 78, porém dada a lógica adotada de que se houver atuação de qualquer uma das fases o gerador é desconectado, mesmo num caso crítico desse os requisitos da concessionária são observados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. “Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004” (2004).
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. “Resolução Normativa nº167, de 10 de outubro de 2005” (2005).
- [3] COPEL, “Requisitos técnicos para a conexão de geração em paralelo com o sistema elétrico da COPEL”. Versão abril de 2006, Vendas a grandes clientes.
- [4] LEUVEN EMTP CENTER. “Alternative Transients Program Rule Book”, United Kingdom (1987).
- [5] DUBÉ, Laurent. “Users guide to MODELS in ATP”, Neskowin, Oregon-USA (1996).