

UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

LUIZ FERNANDO GONÇALVES*, ROMEU REGINATTO*, ALEXANDRE SANFELICE BAZANELLA†

**Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Osvaldo Aranha, 103, 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil*

Emails: luizfg@eletro.com.br, romeu@eletro.ufrgs.br, bazanela@eletro.ufrgs.br

Abstract— This work presents an experimental setup aimed to the study of distributed generation systems, specially in the context of independent producers connected to distribution lines. The hardware and software structure employed in the experimental setup are presented together with experimental results illustrating its functioning.

Keywords— Distributed generation, Experimental setup, Power systems.

Resumo— Este trabalho apresenta uma plataforma experimental para o estudo de sistemas de geração distribuída, mais especificamente de produtores independentes conectados ao sistema de distribuição. As estruturas de hardware e software para esta plataforma são apresentadas, bem como resultados experimentais ilustrativos de sua aplicação.

Palavras-chave— Geração distribuída, Plataforma experimental, Sistemas de potência.

1 Introdução

As recentes mudanças de estrutura no sistema elétrico (geração, transmissão, distribuição e comercialização) têm motivado o uso de pequenos produtores independentes conectados aos sistemas de distribuição e transmissão. Sendo recente, ainda há muitas lacunas quanto ao entendimento do impacto deste novo paradigma na estabilidade e outros índices de desempenho do sistema (Spier et al., 2002), (Donnelly, 1996) e (Barker and Mello, 2000).

Esta nova topologia de sistema elétrico impõe uma série de desafios teóricos e práticos a serem resolvidos pela comunidade científica. Motivado por esta realidade, este trabalho busca contribuir para estes estudos através do desenvolvimento de uma plataforma experimental dedicada ao estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída.

A plataforma desenvolvida consiste em um protótipo de um produtor independente conectado ao sistema de distribuição e de estruturas de hardware e software necessárias para a realização de experimentos. Pretende-se com isto emular o comportamento de um Produtor Independente ligado à rede de distribuição per-

mitindo a realização de ensaios experimentais de interesse.

O presente trabalho é organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma descrição física e lógica do protótipo, a seção 3 apresenta os resultados de ensaios práticos realizados e a seção 4 apresenta as conclusões e perspectivas futuras desta plataforma.

2 Descrição/Implementação do Sistema

A Fig. 1 ilustra o diagrama unifilar do protótipo de GD que se pretende implementar. A idéia principal é que este protótipo reproduzirá as características de produtor independente real, porém em uma escala de tensão e potência menores. O protótipo consiste de um grupo gerador conectado a uma linha de distribuição com várias barras ligadas a diversas cargas, como visto na Fig. 1.

Dentre os objetivos principais da montagem deste protótipo, conectado à rede interna do DELET na UFRGS, pode-se citar a realização de ensaios experimentais diversos e confrontações destes com os resultados teóricos de simulações.

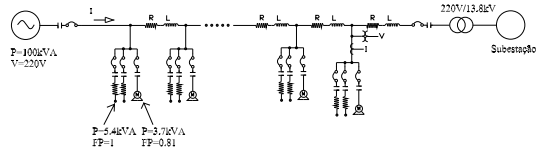


Figura 1: Diagrama unifilar do sistema.

2.1 Estrutura Física

O Protótipo de Produtor Independente é constituído fisicamente de um motor à diesel e de um gerador síncrono conectado ao barramento e as cargas. A idéia central é a configuração de um produtor independente de energia ligado ao sistema de distribuição e transmissão.

A Fig. 2 fornece uma visão geral e mais completa do sistema e dos diversos elementos que o compõem.

Diversas cargas resistivas e indutivas podem ser ligadas na saída do gerador através de trechos de linha, conectando o gerador à rede de distribuição de baixa tensão (220V). O seccionamento é realizado por meio de contatoras.

Conta-se adicionalmente com Controladores Lógico Programáveis (CLPs), com disjuntores, acionados manualmente e com uma série de resistências e motores simulando as cargas. Existem também sensores de velocidade, atuadores e reguladores de velocidade e de tensão instalados na máquina primária e no gerador os quais se comunicam com os CLPs.

A proteção do sistema é realizada pelos disjuntores conectados à saída do gerador e à entrada da rede de distribuição. Já a supervisão do sistema é realizada por meio de um microcomputador conectado aos CLPs.

Os ensaios de salto de tensão são realizados por meio do ajuste da tensão de campo do gerador síncrono. Já os ensaios de frequência e de fluxo de carga são executados através da variação da tensão de um atuador de velocidade presente na máquina primária. Os ensaios de potência são efetuados via acionamento de cargas, por meio de contatoras, ligadas na saída do gerador. Os ensaios de fluxo de carga e de curto-circuito estão ainda por serem finalizados.

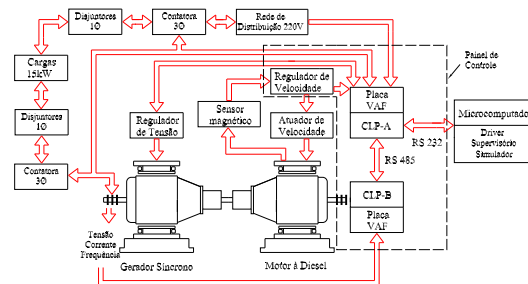


Figura 2: Diagrama esquemático do sistema.

2.1.1 Grupo Gerador

O Grupo Gerador pode fornecer uma potência contínua efetiva de 100kVA, com uma tensão de 220/127V, uma frequência de 60Hz e um fator de potência 0.8 indutivo. Possui ainda, um quadro de comando automático, com sistemas de partida, parada, supervisão e transferência de carga automática.

O Grupo Gerador apresenta ainda proteções com parada automática na ocorrência de defeitos, tanque de combustível, bateria com cabos e terminais, carregador automático de baterias, sistema de pré aquecimento e demais acessórios. Para acionar o gerador utiliza-se um motor à diesel, o qual pode fornecer uma potência contínua de 121CV.

2.1.2 Linha

Os vários trechos de linha de transmissão, conforme vistos na Fig. 1, são emulados por indutores fabricados para fornecer valores de resistência elétrica e reatância indutiva adequados. A resistividade elétrica do condutor utilizado na fabricação produz a resistência da linha.

2.1.3 Cargas

Conforme a concepção geral do circuito apresentada na Fig. 1, a idéia inicial é ter vários blocos de cargas ligados a vários trechos de linha conectados entre o gerador síncrono e a rede de distribuição, permitindo o seccionamento das cargas e emulando diferentes composições de cargas ativas e reativas.

As cargas instaladas na saída do gerador síncrono são compostas por um conjunto de resistências e motores de indução, com rotor do tipo gaiola, que podem fornecer uma potência individual de 3.7kW. As resistências, possuindo uma potência de 5.4kW cada, ficam dentro de um recipiente com água.

2.2 Sistema Supervisório

As telas para o gerenciamento, monitoramento, controle, ensaios e simulações, do protótipo de produtor independente, foram geradas através do *software* supervisório Elipse SCADA.

No sistema em questão, associam-se *Tags* a valores de registradores do CLP. Assim, através do *Driver* de comunicação serial, os valores dos registradores (variáveis) são passados, em tempo real, aos respectivos *Tags* e vice-versa. As variáveis podem ser entradas e/ou saídas analógicas e/ou digitais. Tais *Tags* podem ser ainda processados internamente pela aplicação supervisória através da execução de *Scripts* (pequenos trechos de programas) escritos na linguagem *Elipse Basic* ou por meio de *Tags* que efetuam o cálculo de expressões matemáticas.

As telas do supervisório incluem basicamente: uma tela principal para monitoramento e controle, uma para simulações e telas para realização de ensaios de frequência, de tensão, de fluxo de carga e de cargas.

2.2.1 Telas de Supervisão e Controle

As telas para supervisão e controle do grupo gerador foram desenvolvidas com o intuito de passar um sentimento visual do que está ocorrendo durante os ensaios e simulações.

Na Fig. 3 têm-se a tela principal da aplicação supervisória. Nesta tela, o usuário consegue visualizar os valores das variáveis do processo, tais como os valores de tensão e corrente do gerador e do barramento, através de gráficos ou por meio de *displays*.

Há uma série de botões com as mais variadas funções: parada de emergência, iniciar ou finalizar a aplicação, ligar ou desligar o gera-

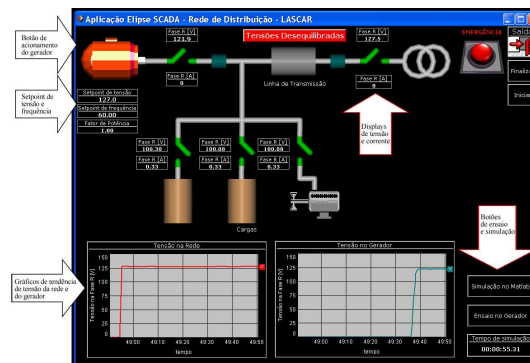


Figura 3: Tela principal do supervisório.

dor, fechar ou abrir contadoras, realizar ensaios e simulações, por exemplo.

Há também *setpoints* para ajuste do valor de referência de tensão e de frequência do gerador. Ainda, em um *display*, o operador pode observar o tempo transcorrido de utilização da aplicação.

2.2.2 Tela de Sincronismo

Uma tela, denominada *Tela de Sincronismo*, é usada para a visualizar as principais variáveis do grupo gerador durante a fase de conexão do gerador à rede. São mostradas variáveis como a frequência do gerador, tensões do barramento, bem como uma sinalização do equilíbrio das tensões de cada fase (visualmente apresentadas como lâmpadas). Esta tela é exibida ao clicar-se sobre o botão que representa a contadora que liga o barramento ao grupo gerador.

2.2.3 Telas de Ensaios

Por meio de um clique sobre o botão *Ensaios no Gerador*, Fig. 3, uma tela de escolha de ensaios é exibida. O usuário pode optar dentre os quatro ensaios disponíveis qual deseja realizar. Nas telas de ensaios, um gráfico de tendência mostra o valor de tensão em uma das fases, ou de frequência do gerador a cada instante de tempo. A Fig. 4 exhibe a tela de ensaios de tensão. Nos ensaios de tensão e frequência existe um *setpoint*, útil para digitar o valor do salto de tensão ou de frequência em PU que deseja-se aplicar ao gerador.

Há também botões, cujas funções principais são enviar o valor do salto de tensão ou de frequência digitado ao atuador de tensão ou de velocidade e de gravar os relatórios, gerados a partir de arquivos históricos de tensões ou de frequência, contendo também a escala de tempo, no formato .M para posterior análise no *Matlab*.

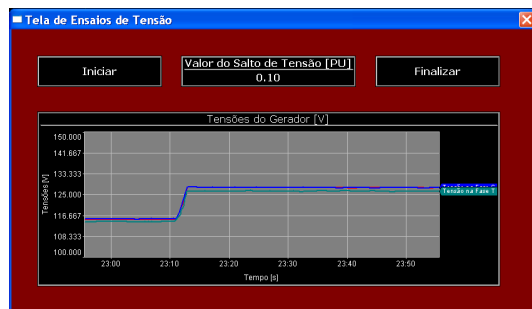


Figura 4: Tela de ensaios de tensão.

2.2.4 Tela de Simulação

O sistema supervisor é integrado ao *Matlab* para fins de realizar simulações simultaneamente a ensaios, também permitindo análises comparativas. Através da tela de simulação, Fig. 5, é possível efetuar o controle destas simulações. Escolhe-se nesta tela, por meio de *sliders*, dentre seis modelos de gerador, o modelo que irá ser usado nas simulações, bem como dentre os três tipos de ensaio, apresentados a seguir, qual será realizado:

- regime permanente;
- rampa de potência;
- salto de tensão.

Através de *setpoints* o usuário estipula o valor de tensão do barramento, o valor da tensão do gerador, de potência elétrica, entre outros. Há também outros *setpoints* que definem certos parâmetros necessários às rotinas no *Matlab*, cito: o estado da rede, o erro de solução de cada amostra, o tempo de simulação, etc. Há também sete botões, sendo que seis permitem escolher quais variáveis (delta, módulo e ângulo da tensão de saída do gerador,

módulo e ângulo da corrente de saída do gerador e potência elétrica) serão impressas em uma tela a medida que a simulação ocorre. O sétimo botão é responsável por iniciar e finalizar o processo de batelada que irá gravar os dados em arquivos históricos, gravar os dados dos relatórios, gerados a partir dos arquivos históricos, no formato .M e disparar o ensaio no *Matlab*.

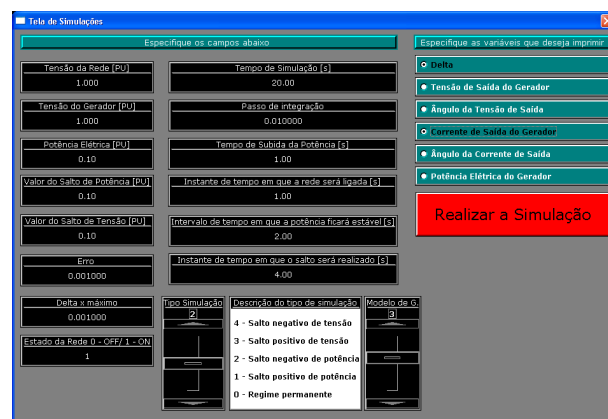


Figura 5: Tela de simulações.

2.3 Simulador

Fez-se necessário, para os propósitos da plataforma experimental, uma ferramenta que fosse aberta e que permitisse incluir modelos alternativos aos modelos clássicos de SEP justamente para contemplar as especificidades dos sistemas de geração distribuída. Não pretendeu-se construir um simulador genérico de SEP para competir com os simuladores comerciais e sim para ter-se uma ferramenta aberta e específica para o caso em questão.

Tendo em vista esta situação, mister se fez o desenvolvimento de um Simulador de Dinâmica de Sistemas de Potência, o qual foi desenvolvido com base no *Matlab*. A principal característica do simulador é possuir flexibilidade na estrutura e na modelagem do sistema a ser simulado (modelo genérico); permitindo assim, a simulação de qualquer sistema de potência e possibilitando a análise de vários modelos de geradores, de cargas e de linhas, bem como de diversas situações que possam ocorrer na linha.

2.3.1 Representação Singular

Do ponto de vista da modelagem de um sistema de potência, composto por geradores interligados à carga por meio de linhas de transmissão, normalmente é considerada a dinâmica apenas dos geradores, enquanto as cargas e a linha de transmissão são descritas por relações estáticas (leis de Kirchoff).

A representação geral do sistema de potência pode ser colocada na forma de um sistema algébrico-diferencial, também conhecido como sistema singular ou descritor, conforme abaixo (Bazanella, 1993):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \quad (1a)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) = 0. \quad (1b)$$

onde:

- \mathbf{x} é um vetor de variáveis de estado;
- \mathbf{z} é um vetor de variáveis algébricas;
- \mathbf{u} é um vetor de entradas;
- $\mathbf{f}(\cdot, \cdot, \cdot, \cdot)$ e $\mathbf{g}(\cdot, \cdot, \cdot, \cdot)$ são funções vetoriais não lineares.

A representação do sistema como um todo é obtida a partir das equações oriundas da modelagem isolada dos componentes do sistema. Isto é realizado conectando as equações correspondentes a cada um dos componentes, ou seja, identificando as variáveis comuns a mais de um componente e representando esta inter-relação em um único sistema de equações.

A representação algébrico-diferencial do sistema, mais especificamente a descrição estrutural das funções \mathbf{f} e \mathbf{g} em (1), constitui a informação básica de entrada para o simulador desenvolvido como parte da plataforma experimental.

O procedimento usado pelo Simulador trata de, a cada instante de tempo, calcular simultaneamente os valores dos vetores \mathbf{x} e \mathbf{z} ; por isto, também chamado de solução instantânea. Fazendo uso de algum método de integração numérica pode-se unir as equações em um sistema de equações algébricas não lineares e assim, obter a solução para $\mathbf{x}(t)$ e $\mathbf{z}(t)$ naquele instante de tempo. Procedendo assim torna-se

possível também aplicar o Método de Newton-Raphson para solucionar este sistema de equações não-lineares a cada instante de tempo.

O método de integração utilizado para resolver as equações foi a regra do trapézio ou regra de Euler Modificada, cuja idéia central é aproximar a derivada no intervalo de tempo entre t e $t - \Delta t$, onde Δt é o passo de integração, por uma constante cujo valor é tomado como a média entre os valores da derivada nos extremos do intervalo.

3 Exemplos de Ensaios e Simulações

A Fig. 6 exhibe o resultado experimental de um salto de tensão de 0.1PU aplicado ao gerador, com a tensão do barramento igual a 1PU e a potência elétrica igual a 0.3PU.

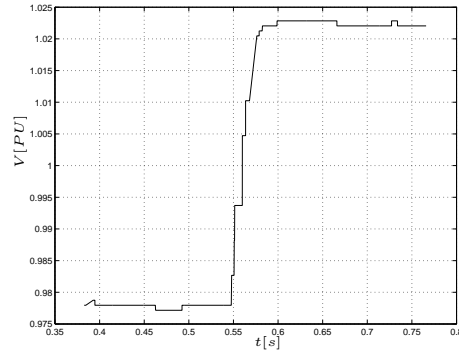


Figura 6: Ensaio de tensão realizado no gerador

Os valores das constantes empregadas na modelagem dos geradores e dos trechos de linha são apresentados em (Gonçalves, 2004). O número de amostras nas simulações é fixo e igual a 1000, sendo que os valores de certas variáveis, como a tensão do barramento por exemplo, são definidos pelo usuário por meio de *setpoints*, como descrito anteriormente.

A Fig. 7 exhibe o resultado experimental de um salto de frequência de 0.01PU realizado ao gerador, para as mesmas considerações feitas para o salto de tensão. Ressalta-se que este ensaio é concebido para ser realizado somente quando o gerador não está conectado à rede.

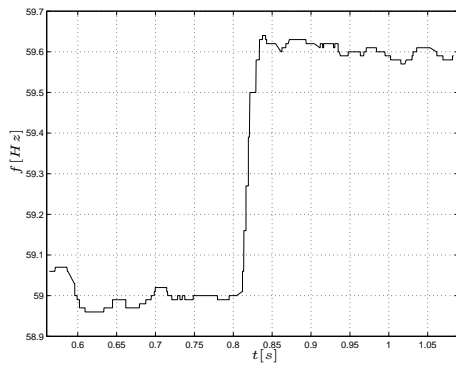


Figura 7: Ensaio de frequência realizado no gerador

4 Conclusões

O sistema supervisório mostrou-se eficiente e robusto no controle do grupo gerador. Por meio de uma interface amigável é possível o acionamento/parada do gerador, ligar/desligar as cargas, realizar ensaios de frequência e tensão. A leitura das variáveis tais como tensão, corrente e potência do grupo gerador também foi satisfatória.

Os bons resultados apresentados pelo supervisório demonstraram a potencialidade deste sistema e encoraja o prosseguimento e finalização deste. Este deve ser direcionado então na melhora dos tempos de leitura e escrita dos dados vindos do CLP, nos arquivos históricos armazenados pelo supervisório e na finalização do sincronismo do gerador com o barramento.

A aplicação do simulador para diferentes SEP mostrou-se viável, devido ao pequeno esforço computacional envolvido na solução do sistema de equações não lineares. Os resultados de simulação mostraram a adequação e efetividade do simulador aos aspectos de interesse.

Como trabalhos futuros pode-se destacar:

- melhora da taxa de transmissão dos dados dos CLP para o supervisório para que se possa observar melhor os transitórios do gerador síncrono.
- realização de mais análises teóricas e práticas, comparando os resultados obtidos

do modelo com a realidade;

- ensaio de interligação do grupo gerador em paralelo com a rede elétrica, cumprindo alguns requisitos mínimos exigidos pela distribuidora, tais como o equilíbrio das tensões, frequência e fase do gerador com a rede de distribuição;
- melhoria do protótipo: instalando um medidor de combustível, e mais baterias para aumentar o número de partidas do gerador.

Referências

- Barker, P. P. and Mello, R. W. (2000). Determining the impact of distributed generation on power systems, *Radial Distribution Systems*, Vol. 3, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, EUA, pp. 1645–1656. Part 1.
- Bazanella, A. S. (1993). *Controle autoajustável de sistemas de potência*, Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Donnelly, M. K. (1996). Impacts of the distributed utility on transmission system stability, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**: 741–746.
- Gonçalves, L. F. (2004). *Contribuições para o estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída*, Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRGS, Porto Alegre.
- Spier, E. B., Bazanella, A. S., Lemos, F. A. B. and da Rosa, M. A. (2002). Avaliação da conexão de produtores independentes em alimentadores radiais de sistemas de distribuição, *VII Symposium of Specialists In Electric Operational And Expansion Planning, SEPOP*.