

A Importância dos Sistemas de Controle Coordenados nas Usinas de Geração Solar

Michael Mills-Price
Advanced Energy Industries, Inc.

Kei Hao
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
1st Annual PAC World Americas Conference
Raleigh, North Carolina
23-25 de setembro de 2014

Traduzido para o português em julho de 2016

A Importância dos Sistemas de Controle Coordenados nas Usinas de Geração Solar

Michael Mills-Price, *Advanced Energy Industries, Inc.*
Kei Hao, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Sumário—As usinas de energia solar fotovoltaica (FV) estão surgindo através dos Estados Unidos por incentivos estaduais e federais para atender às exigências do portfólio de energias renováveis. A integração dessas usinas FV às redes elétricas existentes pode causar sérios impactos na qualidade de energia, confiabilidade e na estabilidade geral do sistema elétrico de potência. A coordenação da usina FV e sua interligação com o sistema elétrico existente de distribuição e/ou subtransmissão são essenciais para uma operação confiável do sistema elétrico.

Este artigo descreve a operação de um sistema de controle de uma usina de geração FV frente aos desafios associados à interligação destas instalações ao sistema de potência. Basicamente, o sistema de controle de uma usina monitora os equipamentos e funções de controle internas da usina e o ponto de interconexão (POI) e atua ajustando os pontos operacionais dos equipamentos para atender aos requisitos da interconexão. O sistema de controle ainda deve considerar também condições imprevisíveis como faltas no sistema elétrico ou condições meteorológicas extremas.

O artigo descreve também a integração do sistema de controle com dispositivos e equipamentos externos e internos da usina FV, feita com vários protocolos de comunicação disponíveis. Os dispositivos e equipamentos internos incluem inversores FV, estações meteorológicas, rastreadores do sol, relés de proteção, medidores de faturamento, geradores locais e sistemas de alarme. Os equipamentos externos incluem sistemas de previsão meteorológica, sistemas de gerenciamento de energia e interfaces com o sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA), para citar alguns.

A arquitetura de controle da usina também é discutida em detalhes, demonstrando diversos esquemas de controle, tais como controle de malha aberta, malha fechada, etapa sequencial e controle baseado em restrição de tempo. Estes esquemas abrangem uma ampla faixa de aplicações possíveis, sendo alguns exemplos do mundo real discutidos numa seção deste artigo. Para alcançar controles confiáveis e deterministas usando uma variedade de protocolos de comunicação e meios associados, os indicadores de status internos ao equipamento de campo são alavancados como parte de um esquema mais complexo. Além do status de comunicação fornecido pelos protocolos, este artigo descreve como a técnica de bit de latência (também conhecida como batimento cardíaco) pode auxiliar na obtenção de controles mais confiáveis.

I. INTRODUÇÃO

A integração das usinas de energia solar fotovoltaica (FV) às redes elétricas existentes tem aumentado rapidamente nos últimos anos. Isso é amplamente impulsionado por incentivos estaduais e federais para atender às exigências do portfólio de energias renováveis. A integração dessas usinas FV intermitentes às redes elétricas existentes pode causar sérios impactos na qualidade de energia, confiabilidade e na estabilidade geral do sistema elétrico de potência.

A Fig. 1 ilustra o impacto da adição de uma usina de geração solar FV em uma rede elétrica existente. A rede

elétrica, que pode ser parte de uma rede de distribuição ou subtransmissão, inclui vários ramais das cargas dos consumidores. Quando uma usina de geração FV está localizada a uma certa distância de uma usina de geração convencional e injeta apenas potência ativa na rede, as flutuações de tensão no ponto de interconexão (POI) variam enormemente dependendo da radiação solar incidente. Uma redução súbita da radiação pode provocar a queda da tensão abaixo das variações permitidas (5 a 10 por cento) e a atuação de um relé de proteção para abrir o disjuntor do POI através dos elementos de subtransmissão [1] [2].

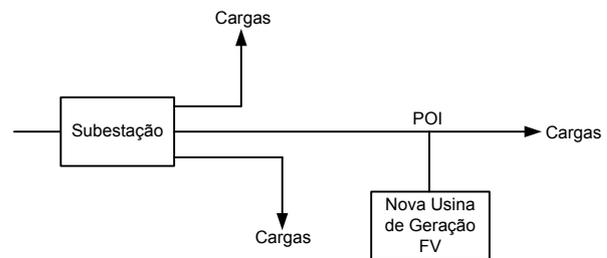


Fig. 1. Usina de Geração FV Conectada à Rede Elétrica

Adicionalmente, se a rede for projetada e operada para o fluxo de potência unidirecional (a partir da subestação para as cargas), a geração FV pode causar fluxo de potência bidirecional, resultando em problemas para os equipamentos de proteção existentes. Ainda podem surgir problemas associados ao barramento da subestação, tais como amplas oscilações no fluxo de potência ativa e retorno de energia de outros alimentadores. O projeto do circuito, juntamente com o local da instalação elétrica, pode potencialmente afetar as variações de tensão, estabilidade da rede, esquemas de regulação de tensão, qualidade de energia, além da proteção e coordenação [3].

O conceito de um controlador de usina FV consiste na implementação de um sistema de controle que utiliza os inversores de geração FV individualmente para compatibilizar o montante de potência (tanto ativa quanto reativa) necessário e, dessa forma, minimizar quaisquer impactos negativos na rede elétrica [2] [3] [4] [5] [6]. Para que isto seja obtido, é necessária a coordenação entre o sistema de controle da usina FV, a subestação e o sistema elétrico de potência da região. O sistema de controle da usina de geração FV precisa não apenas fornecer as funções internas de controle e monitoramento da usina, mas também interagir diretamente com sistemas externos, tais como sistemas de gerenciamento de energia (EMSs) e sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA) da concessionária. Essas interações são essenciais para atender aos requisitos de interconexão e operacionais do sistema elétrico.

Este artigo propõe uma arquitetura de sistema para um sistema de controle de uma usina FV, descrevendo em detalhes os componentes e suas interações. O trabalho descreve os requisitos-chave para os protocolos de comunicação e sistema de controle coordenado. Baseando-se na arquitetura proposta, o artigo demonstra diversos esquemas de controle, incluindo controles de malha aberta, malha fechada, etapa sequencial e esquemas de controle baseados na restrição de tempo, abrangendo uma ampla faixa de aplicações possíveis. As seções finais deste artigo discutem diversos exemplos de controles já aplicados e em operação no mundo real.

II. ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO

O sistema de controle consiste de um conjunto de dispositivos sensores, controladores de equipamentos, dispositivos de entrada de dados e sistemas como SCADA e interfaces homem-máquina (IHMs), o controlador mestre da usina FV, redes e dispositivos de comunicação, conforme ilustrado na Fig. 2. Para simplificar, as redes e dispositivos de comunicação são omitidos na figura. Detalhes relevantes e descrições funcionais dos inversores FV, relés microprocessados e medidores, bem como das IHM e SCADA podem ser encontrados em [7] [8].

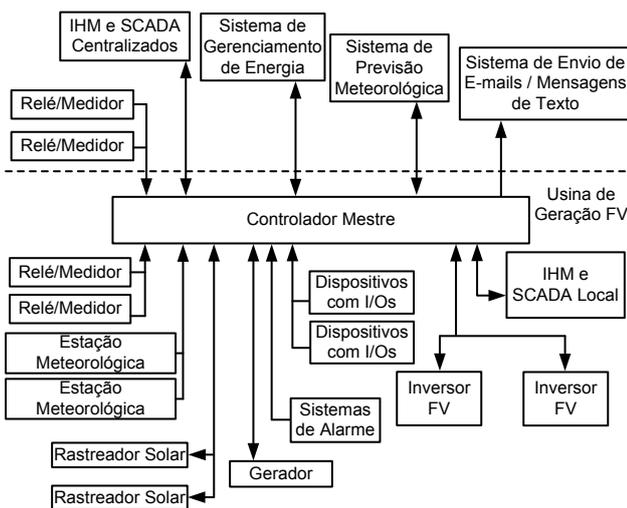


Fig. 2. Arquitetura do Sistema

As subseções seguintes discutem as interações entre os componentes do sistema de controle e o controlador mestre.

A. Dispositivos Sensores

Os sensores de uma usina de geração FV incluem relés de proteção baseados em microprocessador, medidores, dispositivos com entradas/saídas (I/O), rastreadores solares e sistemas de alarme. Os recursos de comunicação e lógicas personalizadas torna esses dispositivos ideais para serem usados como entrada de dados para o controlador mestre. Deslocando mais lógicas de controle para os dispositivos sensores e minimizando a quantidade de troca de dados com o controlador mestre simplifica a interface de controle e reduz a carga no controlador. Os sensores que não suportarem funções incorporadas precisam ter capacidades de comunicação para que possam enviar as grandezas observadas e medidas para o controlador mestre e permitir que o controlador execute as funções de controle. Embora um dispositivo sensor possa se tornar um ponto único de

falha para algumas aplicações, é importante também considerar a falha do dispositivo, falha de comunicação, taxa de transferência de dados da rede e latência.

B. Controladores dos Equipamento

O sistema de controle requer equipamentos tais como inversores e rastreadores solares que suportem comunicações bidirecionais. Os controladores de equipamentos têm de ser capazes de aceitar comandos, responder às condições normais e anormais e fornecer as respectivas condições de alarme e status operacional para que o controlador mestre possa usá-las na coordenação com outros equipamentos. Isso garante a integridade do sistema de geração e, basicamente, as necessidades de interligação no POI. Os sinais de controle variam amplamente dependendo das necessidades da aplicação. No entanto, eles podem incluir mudanças do ponto de ajuste, modos de operação, perfis de sustentação e comandos de ligar e desligar, para citar alguns.

C. Controlador Mestre

O controlador mestre atua como coordenador do sistema de controle completo, fornecendo as interfaces necessárias para garantir que todos os componentes estejam trabalhando juntos e adequadamente. O controlador fornece o status operacional da usina e dos sistemas externos, e gera um conjunto de sinais de comando para cada subsistema, ajustando a operação da usina para atender aos requisitos de interconexão local. Em alguns casos, o controlador mestre implementa ambas as funções de controle e concentração de dados. Em tais casos, a carga de processamento do controlador mestre precisa ser cuidadosamente avaliada devido à enorme quantidade de dados requeridos pelos sistemas SCADA e IHM. Em outros casos, as funções de controle são separadas da concentração de dados e implementadas em diferentes equipamentos de rede (monitoramento em um deles, controle no outro).

Se um controlador mestre for usado no sistema de controle, ele se torna um ponto único de falha do sistema. Para aumentar a confiabilidade e disponibilidade do sistema de controle, mais de um controlador pode ser usado. Tanto as técnicas de redundância standby (também conhecida como redundância de backup) quanto as técnicas de redundância modular (ou paralela) podem ser implementadas. A implementação de controladores redundantes está além do escopo deste artigo.

D. Redes e Sistemas de Comunicação

As redes e sistemas de comunicação são partes cruciais do sistema de controle. A Referência [7] fornece detalhes sobre as redes e sistemas de comunicação que são essenciais. Segurança cibernética é importante e deve ser cuidadosamente considerada durante a implementação. No entanto, para efeito de brevidade, elas são omitidas neste artigo.

Os protocolos de comunicação padrão (abertos) são preferidos em relação aos protocolos de comunicação proprietários para uso no sistema de controle. Os protocolos de comunicação padrão oferecem a grande vantagem de interoperabilidade entre diferentes fabricantes. Protocolos de comunicação incluem Modbus®, DNP3, IEC 61850 e IEEE C37.118. Experiências têm demonstrado que o uso de

um único protocolo de comunicação uniforme no sistema de controle facilita e melhora enormemente a manutenibilidade e escalabilidade do sistema. Em geral, a existência de interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes aumenta a reusabilidade e portabilidade das soluções de controle.

E. Sistemas de Previsão do Tempo e Estações Meteorológicas

Devido à natureza intermitente e variável da radiação solar, efetuar uma previsão e cálculo da quantidade de energia produzida pelas usinas de geração FV em qualquer instante no tempo representa um grande desafio para uma concessionária. Uma previsão exata ajuda a concessionária e os operadores do sistema a efetuar uma melhor alocação dos recursos visando manter as características de suporte de frequência e tensão do sistema elétrico de potência. Os sistemas de previsão do tempo e as estações meteorológicas são componentes essenciais para efetuar uma previsão exata da produção de energia. Os sistemas de previsão meteorológica usam diversos métodos para prever a potência de saída de uma usina de geração FV, variando desde medições atmosféricas multiponto, observações e análises de imagens do céu e satélite, até modelos numéricos de previsão meteorológica (NWP) [9].

As estações meteorológicas locais servem para fornecer dados meteorológicos em tempo real para os sistemas de previsão. Estes dados podem ser arquivados e usados posteriormente por sistemas de previsão que usam dados históricos em seus modelos. Na arquitetura proposta, o controlador mestre fornece a interface entre as estações meteorológicas locais e os sistemas de previsão meteorológica.

As estações meteorológicas possuem normalmente um conjunto de dispositivos sensores que medem condições climáticas locais, tais como temperatura ambiente, umidade relativa, nível de precipitação, velocidade e direção do vento, e pressão barométrica. Outros dados podem incluir radiação solar, temperatura dos painéis FV e total de horas de pico do sol. A maioria dos dispositivos de detecção suporta protocolos de comunicação abertos como Modbus e fornece valores analógicos e condições de alarme para o controlador mestre.

F. Dispositivos de I/Os

Os dispositivos de I/Os fornecem normalmente sinais discretos que podem vir de transformadores, fontes de alimentação ininterrupta (UPSs), disjuntores e alarmes de detectores de fumaça e fogo do cubículo ou casa de controle. Alguns dispositivos I/Os fornecem as condições de status da usina, e outros fornecem as condições de alarme para as quais o controlador mestre precisa adotar ações imediatas.

G. Sistemas de Envio de Emails e Mensagens de Texto

Uma das funções suportadas pelo sistema de controle é o envio de mensagens de texto e emails. Alguns alarmes exigem intervenção humana após um evento, e o controlador mestre é responsável por fornecer as informações necessárias sobre o evento para os sistemas de envio de emails ou mensagens de texto.

H. Sistemas de Gerenciamento de Energia

Os sistemas de gerenciamento de potência e os EMSs interagem com as usinas de geração FV para duas finalidades principais: obter os dados da usina e gerenciar a produção da usina. A produção tem de ser gerenciada de forma eficaz para compatibilizar a demanda de energia com o suprimento. A arquitetura proposta tem como objetivo suportar as comunicações de dados lentas ou de baixa velocidade entre as partes. Neste contexto, quando os sistemas de gerenciamento de potência fornecem mudanças dos pontos de ajuste tanto de operações manuais quanto programadas, a resposta da instalação FV ocorre num tempo da ordem de segundos a minutos. Os dados recebidos do sistema de controle estão atrasados em relação aos dados em tempo real numa ordem de tempo similar. A arquitetura não tem como objetivo suportar operações de alta velocidade entre os sistemas externos e a usina (por exemplo, corte de geração, onde o tempo de resposta esperado é menor do que 1 segundo).

I. Rastreadores Solares

Os módulos fotovoltaicos podem ser montados em estruturas fixas, onde os módulos FV são inclinados em um ângulo fixo, ou em uma estrutura com rastreadores solares. No segundo caso, os rastreadores solares ajustam a posição dos módulos FV de acordo com a posição do sol ou direcionam a quantidade adequada de luz solar sobre os módulos FV no decorrer do dia. Estudos têm mostrado que um sistema de rastreamento solar pode proporcionar uma melhoria na eficiência de até 60 por cento [10]. Embora as especificações IEC 82/618/NP exijam que o projeto mecânico do rastreador suporte algumas condições meteorológicas extremas, o sistema de controle é basicamente responsável pelo envio dos sinais de comando para posicionar os módulos FV (em uma posição ou ângulo pré-determinado) [11]. Se ocorrerem outras condições imprevisíveis, tais como faltas, interrupções de energia ou determinadas condições de alarme, algumas operações da usina exigem que toda a instalação seja chaveada para um estado conhecido e pré-determinado. Neste caso, o controlador mestre envia sinais para os controladores do rastreador para posicionar os módulos FV no ângulo ou posição previamente determinada.

Dois tipos de rastreadores solares são frequentemente usados em uma usina de geração FV. Os rastreadores de eixo único têm um grau de liberdade que atua como um eixo de rotação. Os rastreadores de eixo duplo têm dois graus de liberdade que atuam como eixos de rotação. Em operações normais, o controlador mestre não envia sinais de comando para os controladores do rastreador. No entanto, quando tais necessidades surgem, os sinais podem ser classificados em três grupos. O primeiro grupo é formado por dados brutos (por exemplo, um ângulo específico em graus para os rastreadores de eixo único). O segundo grupo é um conjunto de comandos definidos como parte da interface entre o controlador mestre e os controladores do rastreador. Cada comando é normalmente representado por um bit. Ao receber os comandos, os controladores do rastreador executam diversas ações. O terceiro grupo é composto por sinais discretos que representam os modos de operação e chaveiam entre os comandos de ligar e desligar.

J. Gerador

Conforme discutido anteriormente, um requisito operacional pode ser o de colocar toda a usina em um estado pré-determinado sob certas condições imprevisíveis e indesejáveis. Quando ocorre uma falta ou uma interrupção de energia, isto pode deixar uma grande parte da usina sem energia elétrica. Tipicamente, a sala de controle da usina possui baterias de backup que podem durar algumas horas e, portanto, suportar funções de dispositivos críticos, tais como relés de proteção, disjuntores, equipamentos de comunicação e os principais controladores. O sistema de baterias não é projetado para energizar os inversores FV, rastreadores solares, dispositivos da rede de comunicação e outros dispositivos do campo. Neste caso, um gerador é necessário para fornecer a energia elétrica mínima suficiente para que os equipamentos possam permanecer alimentados até que o sistema de controle seja capaz de colocar os equipamentos no estado predeterminado. Quando o gerador está em operação, os principais controladores têm de garantir que todas as seccionadoras e disjuntores no POI (todos interligados com a concessionária) estejam abertos e bloqueados. O fechamento precisa ser evitado para impedir o backfeed, e isto tem de ser assegurado pelo sistema de controle da usin. Uma vez que a operação tenha sido concluída, o gerador é desligado e desconectado do sistema.

As interações entre o sistema de controle e o gerador incluem ligar e desligar o gerador, abrir e fechar a seccionadora ou disjuntor do gerador, e coletar alguns sinais das I/Os que monitoram o status do gerador (por exemplo, nível de combustível).

III. REQUISITOS DO SISTEMA DE CONTROLE

Esta seção discute alguns requisitos-chave dos protocolos de comunicação e controlador para as operações do sistema de controle.

A. Protocolos de Comunicação de Alta Velocidade Versus Baixa Velocidade

Um protocolo de comunicação de alta velocidade é um protocolo no qual uma mensagem pode chegar ao seu destino em milissegundos. Um padrão bem conhecido é o IEC 61850, que inclui um protocolo multicast de alta velocidade: a troca de mensagens Generic Object-Oriented Substation Event (GOOSE). É um protocolo Ethernet não roteável de Camada 2 do modelo de interconexão de sistemas abertos OSI [12]. Outros protocolos proprietários de alta velocidade incluem os protocolos baseados em comunicação serial ponto-a-ponto.

Os protocolos de comunicação de baixa velocidade têm restrições de tempo menos rigorosas que podem ser da ordem de segundos. Tais protocolos incluem DNP3, Modbus, IEC 61850 Manufacturing Message Specification (MMS), e assim por diante. Algumas aplicações exigem variação de baixa latência nos sinais de comando de baixa velocidade do controlador mestre para os destinos. A variação de latência elevada pode afetar o desempenho das estratégias de controle, o que é discutido na Seção IV.

B. Requisitos Técnicos do Controlador Mestre

Um dos principais requisitos técnicos do controlador mestre consiste em suportar múltiplos programas e tarefas,

onde cada tarefa possui seu próprio ciclo. Isso permite que o sistema de controle separe as funções de controle para diferentes aplicações e delegue tarefas com base nos respectivos requisitos de tempo. Os controladores de automação que atendem à norma IEC 61131 suportam estes recursos. Além disso, o controlador mestre tem de suportar ambos os protocolos de comunicação de baixa e alta velocidade.

Embora não exigido, o uso de controladores de automação que suportem bibliotecas melhora enormemente a escalabilidade, reusabilidade e robustez do sistema. As bibliotecas podem ser usadas para encapsular estratégias e funções de controle comprovadas, bem como para apresentar uma interface do aplicativo para o usuário. Isso ajuda a evitar alterações indesejáveis das funções núcleo devido a erro ou inexperiência do usuário.

IV. ESQUEMAS DE CONTROLE

Esta seção discute alguns esquemas de controle tradicionais e ilustra como estes esquemas podem ser aplicados na implementação de um sistema de controle coordenado de uma usina de geração FV.

Em um sistema de controle contínuo, um processo ou planta é o sistema a ser controlado. Uma variável de processo é a saída do processo que pode ser medida pelo sistema. Uma variável de controle é a entrada do processo que pode ser ajustada pelo sistema de controle.

A. Controle de Malha Aberta

Baseando-se na arquitetura proposta, o ponto de ajuste pode ser alterado a partir do sistema IHM e SCADA centralizado ou local em um esquema de controle de malha aberta. Uma vez que o sistema de controle tenha recebido as alterações do ponto de ajuste, ele verifica se o ponto de ajuste atual está dentro do intervalo aceitável e envia o sinal de controle (ou variável de controle) para o dispositivo através de protocolos de comunicação. O sistema de controle precisa garantir qual sistema SCADA e IHM está operando o sistema baseado no que a chave local/remota indica. Esta chave local/remota não apenas evita possíveis conflitos de controle entre os dois sistemas SCADA e IHM como também fornece segurança quando as equipes da área de operação estão trabalhando na planta ou local.

Exemplos de controle de malha aberta incluem a limitação da potência de saída dos inversores, ajuste do mesmo fator de potência para todos os inversores, e posicionamento de todos ou de uma parte dos módulos do painel em ângulos (posições) específicos para manutenção.

O controle de malha aberta usa frequentemente protocolos de comunicação de baixa velocidade, onde o tempo de resposta é menos relevante.

B. Controle por Antecipação

As usinas de geração FV são submetidas a distúrbios provenientes da rede quando ocorrem alterações de carga e operações de chaveamento. Outros fatores que podem distorcer uma variável de processo (por exemplo, medição no POI) incluem os componentes internos da usina. Tais componentes podem ser a impedância e resistência dos cabos, impedâncias do transformador, e assim por diante. Se as grandezas distorcidas forem conhecidas ou puderem ser medidas, o sistema de controle pode considerá-las, calcular

o(s) ponto(s) de ajuste corretivo(s) que são afetados por essas grandezas, e enviar os pontos de ajuste corretivos para os dispositivos finais. Este tipo de controle é conhecido como controle por antecipação (feed-forward control).

Embora os esquemas de controle de malha aberta sejam mais fáceis de implementar do que os esquemas de controle feed-forward, perturbações e distorções internas podem fazer com que as variáveis de processo medidas desviem dos pontos de ajuste. Uma solução para minimizar a distorção em um esquema de controle de malha aberta consiste em calcular ou medir a relação entre o ponto de ajuste e a variável de processo e então criar uma tabela ou uma função e incorporá-la no sistema de controle. Embora o esquema feed-forward possa minimizar certas distorções conhecidas, ele não pode eliminar completamente as variações temporais imprevisíveis dos distúrbios.

O controle por antecipação também usa frequentemente protocolos de comunicação de baixa velocidade, onde o tempo de resposta é menos crítico.

C. Controle de Malha Fechada

A implementação de um esquema de controle de malha fechada é mostrada na Fig. 3. Um sistema de controle de malha fechada consiste de um controlador, dispositivos de detecção para fornecer as medições das variáveis do processo, além do processo ou planta. O controlador compara o ponto de ajuste desejado com a variável de processo medida, calcula a variável de controle para manter o ponto de ajuste desejado, e envia o ponto de ajuste para os dispositivos finais. A diferença entre o ponto de ajuste desejado e a variável de processo é também conhecida como o erro. As vantagens do controle de malha fechada, em comparação com o controle de malha aberta, incluem o aumento da velocidade de resposta, redução do erro e redução da sensibilidade aos erros de modelagem [13] [14].

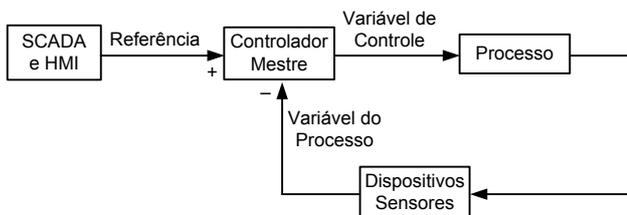


Fig. 3. Controle de Malha Fechada

Exemplos de casos de uso dos controles de malha fechada incluem a medição das velocidades do vento de estações meteorológicas e posicionamento dos módulos FV em ângulos específicos ou manutenção de um fator de potência no POI. No primeiro exemplo, o ponto de ajuste é a alta velocidade do vento e as variáveis do processo são as velocidades do vento medidas pelas estações meteorológicas. Se uma das velocidades do vento for maior do que o ponto de ajuste, o controlador envia os comandos para os controladores do rastreador solar e os controladores do rastreador posicionam os módulos FV em uma posição ou ângulo pré-determinado. No segundo exemplo, o ponto de ajuste é o fator de potência no PI, a variável de processo é o fator de potência medido por um medidor ou relé de proteção no POI, e a variável de controle pode ser o ponto de ajuste do fator de potência do inversor ou ambos os pontos de ajuste da potência ativa e reativa. A Referência

[8] fornece uma discussão detalhada da implementação e desempenho do controlador do fator de potência usando o controle de malha fechada e um Controlador Proporcional e Integral (PI).

Dependendo da aplicação, pode ser necessária uma Proporcional Integral Derivativo (PID). Ao implementar o controle PID, é necessário efetuar considerações durante a escolha dos parâmetros de controle PID. Uma seleção inadequada desses parâmetros pode fazer com que o sistema se torne instável, não convergindo para o ponto de ajuste. Simulações e sintonia dos parâmetros de campo são geralmente necessárias para assegurar o desempenho do sistema.

D. Controle de Etapas Sequenciais

Quando o algoritmo de controle segue uma sequência de etapas, ele é considerado um esquema de controle de etapas sequenciais. Uma sequência simples geralmente não tem operações ou ramificações paralelas e determinadas etapas podem ser puladas dependendo do status ou estado do sistema controlado. As sequências que suportam operações paralelas podem ser de dois tipos: uma seleção de uma sequência entre muitas é denominada ramificação (branching) ou divergência exclusiva e múltiplas sequências sendo executadas simultaneamente são denominadas ramificação AND ou divergência simultânea [13]. Este esquema de controle é usado em aplicações onde uma sequência de etapas precisa ser seguida quando ocorre um determinado evento, ou quando uma determinada condição é atendida (por exemplo, uma falta).

Um exemplo de uso deste esquema de controle aplicável a uma usina solar FV é quando a planta é submetida a uma interrupção de energia. Algumas plantas FV são na verdade conectadas a dois ramais independentes de um sistema de potência. O ramal principal é aquele no qual a usina está ligada, sendo responsável pela exportação e fornecimento de energia para os dispositivos de eletrônica de potência de todos os componentes da planta. O ramal secundário é normalmente apenas usado quando o ramal principal é submetido a uma interrupção de energia. O sistema de controle usa esta fonte secundária para colocar toda a planta de geração em um estado pré-definido, seguindo uma sequência de etapas. Tipicamente, a fonte secundária não é projetada para exportação de potência e o sistema de controle precisa garantir esta função desligando os inversores como uma das primeiras etapas na sequência de controle. Uma vez que toda a instalação esteja conectada à fonte secundária, o sistema de controle estará sob uma rigorosa restrição de tempo dentro do qual precisa garantir que a planta não exporte qualquer potência para a concessionária.

Se uma fonte secundária não estiver disponível ou se ambas as fontes primária e secundária falharem, um pequeno gerador local pode ser usado para fornecer energia para o sistema de controle visando colocar toda a planta em um estado conhecido. Quando o sistema de controle executa os controles das etapas sequenciais, ele tem de garantir que não existem duas fontes em paralelo. O paralelismo de duas fontes sem um mecanismo de sincronização adequado pode causar consequências catastróficas.

O uso de fluxogramas consiste num método adequado para projetar o controle de etapas sequencias. Um fluxograma descreve todas as etapas executadas pelo

sistema de controle, juntamente com todas as condições associadas.

A Fig. 4 ilustra um exemplo simples de tal fluxograma. A lógica verifica inicialmente se a fonte principal está disponível. Se ela não estiver disponível, o controlador verifica a fonte secundária. Se a fonte secundária também não estiver disponível, o controlador fecha o disjuntor do gerador. Neste exemplo, o status do disjuntor é usado para determinar a disponibilidade das fontes. Em aplicações reais, o relé determina o status das fontes e usa elementos de tensão, bem como o status do disjuntor para determinar a disponibilidade de uma fonte.

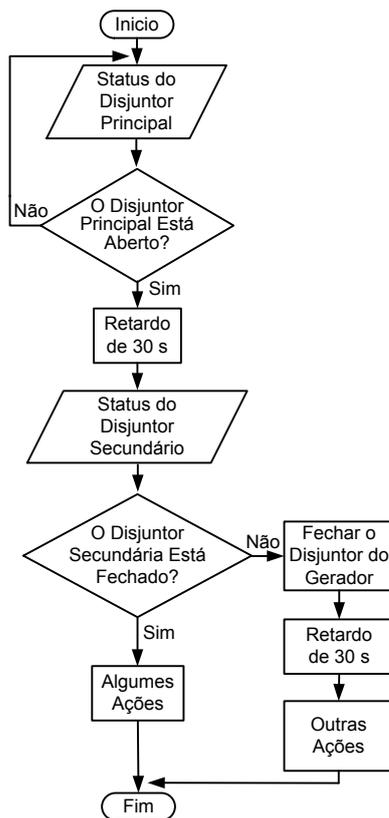


Fig. 4. Exemplo de um Fluxograma

Embora a linguagem do Gráfico de Funções Sequenciais (SFC) da IEC 61131 seja especialmente adequada para seqüências de programação, outras linguagens de programação também podem ser usadas.

E. Controle Baseado na Restrição de Tempo

Um esquema de controle baseado na restrição de tempo é aquele onde uma operação ou função específica tem de ser executada dentro de um determinado limite de tempo. Por exemplo, a Regra 21 da California Electric não permite a exportação de potência na subestação por mais de 2 segundos. Neste tipo de esquema de controle, os dispositivos sensores precisam enviar um sinal usando protocolos de comunicação de alta velocidade. Assim que o sistema de controle tenha recebido o sinal, o sistema de controle tem de processá-lo dentro de um limite de tempo específico (ciclo de tarefa) e fornecer uma saída, seja diretamente ou enviando uma mensagem para o dispositivo final através de protocolos de alta velocidade.

Como este tipo de controle requer protocolos de comunicação de alta velocidade, uma grande quantidade de dados entre o dispositivo de envio e o controlador pode

comprometer a taxa de transferência da rede e outras aplicações de controle simultâneas. Para que isto seja superado, recomenda-se um pequeno conjunto de sinais discretos. Isto exige que os dispositivos de detecção tenham alguns recursos de processamento e sejam capazes de produzir o conjunto de sinais.

V. BITS DE LATÊNCIA

A arquitetura proposta e a operação do sistema de controle dependem enormemente dos sistemas, redes e protocolos de comunicação. Em algumas aplicações, o sistema de controle ou dispositivos finais precisam executar determinadas tarefas imediatamente após a detecção de uma falha de comunicação. Uma abordagem consiste em contar com os indicadores de status internos aos equipamentos. Apesar de o fornecimento de status das comunicações pelos protocolos ter comprovado ser bem-sucedido em muitas aplicações, os métodos baseados em watchdog e bits de latência podem oferecer uma solução mais confiável na detecção de falhas de comunicação.

Conforme discutido em [8], os ciclos de controle longos dos controladores do fator de potência podem fazer com que o sistema se torne instável e incapaz de convergir para o ponto de ajuste. Uma vez que uma grande variação da latência pode ser maior do que o ciclo de controle, isso pode deteriorar o desempenho de um sistema de controle de malha fechada usando um controlador PI. Embora as soluções baseadas em heartbeat e watchdog não possam evitar variações de latência da rede, elas são capazes de indicar se o desempenho foi comprometido.

Os bits de latência (também conhecidos como heartbeats) podem ser facilmente implementados no controlador mestre e nos dispositivos finais que suportam lógicas personalizadas. Basicamente, o controlador mestre gera um trem de pulsos consistindo de zeros e uns alternados. Os dispositivos finais verificam periodicamente os bits alternados nos pulsos, e quando os bits falham em alternar entre duas verificações, considera-se que houve uma falha de comunicação. De forma similar, o método watchdog usa um contador ao invés de pulsos. Quando os dispositivos finais não detectam nenhum incremento do contador, eles declaram uma falha de comunicação.

VI. EXEMPLO 1: CONTROLE DE IHM E SCADA

Neste exemplo, considere duas usinas de geração FV localizadas a 150 metros uma da outra. A capacidade nominal de cada usina é 20 MW e cada uma possui dez plataformas. Cada plataforma tem quatro inversores FV de 500 kW. Os módulos FV são montados sobre estruturas fixas em um ângulo fixo. O controlador mestre está localizado no cubículo principal juntamente com os relés de proteção, medidores de faturamento da concessionária e medidores de faturamento do responsável pela usina. A estrutura principal da rede de comunicação consiste num anel do cabo de fibra óptica e todos os dispositivos de comunicação suportam comunicações Ethernet.

O sistema inclui uma IHM e SCADA local, um controlador mestre, 40 inversores FV, quatro relés de proteção, quatro medidores de faturamento, dez sensores com I/Os do transformador, dois dispositivos de I/Os discretos e duas estações meteorológicas. Os componentes

externos do sistema incluem um sistema IHM e SCADA remota e um EMS.

O protocolo Modbus TCP/IP é usado entre o controlador mestre e todos os dispositivos internos, com exceção de dois medidores de faturamento da concessionária. Estes medidores e todos os sistemas externos usam DNP3 para se comunicar com o controlador mestre.

Os requisitos de controle dessas duas usinas visam alterar os pontos de ajuste dos inversores FV e ligar e desligar os inversores individualmente ou em grupo a partir de uma IHM e SCADA local ou remoto. O EMS apenas tem permissão para alterar os pontos de ajuste. Os pontos de ajuste incluem a saída de potência, fator de potência e taxa de rampa dos inversores FV. Estas mudanças dos pontos de ajuste se aplicam a todos os 40 inversores da usina. O sistema não possui uma chave local/remota, significando que tanto a IHM e SCADA local ou remoto quanto um EMS podem alterar os pontos de ajuste. As interfaces do controlador mestre com o sistema do operador do sistema independente fornecem os dados da planta.

Nesta aplicação, o controlador mestre é usado para fornecer a interface para as funções de controle descritas e atua como um concentrador de dados que coleta os dados dos dispositivos do campo. Esta solução tem provado ser eficaz no cumprimento de todos os requisitos de controle. Neste exemplo, as duas usinas operam de forma independente e suas implementações são quase idênticas.

VII. EXEMPLO 2: CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA

Considere uma planta de geração FV com três inversores de 1 MW e cerca de 40.000 painéis solares. O controlador e um relé de proteção estão localizados dentro do gabinete do cubículo no POI. Os inversores estão localizados a aproximadamente 180, 360, e 540 metros do controlador.

O controlador possui várias portas seriais, uma das quais é conectada diretamente ao relé de proteção que fornece o fator de potência do sistema. Uma segunda porta se comunica com os três inversores. A interface do relé é EIA-232, e os inversores se comunicam através de redes de comunicação full-duplex EIA-485 multidrop a quatro fios. Um modem DSL conectado a um provedor de Internet local é usado para comunicação entre a IHM e SCADA e o controlador. O protocolo de comunicação entre o controlador e o relé de proteção é um protocolo de comunicação proprietário. O protocolo entre o controlador e o sistema IHM e SCADA é Ethernet Modbus TCP/IP, e o protocolo entre o controlador e os inversores é Modbus RTU serial. A Fig. 5 ilustra a implementação do controle de malha fechada.

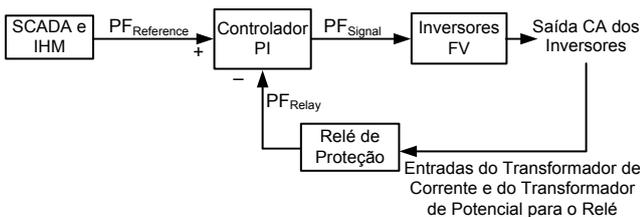


Fig. 5. Esquema de Controle de Malha Fechada do Fator de Potência

A Fig. 6 mostra a implementação do controlador PI, onde K_p e K_i são as constantes proporcional e integral,

respectivamente. A constante integral pode ser escrita como $K_i = K_p/T_i$, onde T_i é a constante de integração.

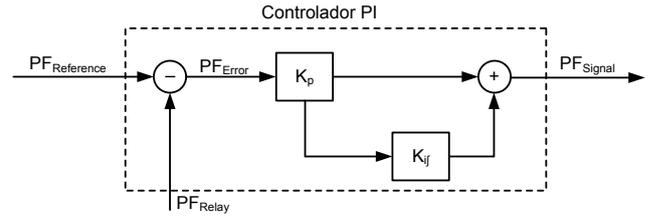


Fig. 6. Controlador PI

O erro do fator de potência é $PF_{Error} = PF_{Reference} - PF_{Relay}$.

O termo integral é aproximado por uma equação diferencial e conduz à equação recursiva em (1).

$$PF_{Integral_New} = PF_{Integral_Old} + \frac{K_p}{T_i} \cdot CRTL_{Cycle} \cdot PF_{Error_New} \quad (1)$$

onde:

$PF_{Integral_Old}$ mostra o termo integral até o instante da amostragem anterior.

$PF_{Integral_New}$ é o instante da nova amostragem.

$CRTL_{Cycle}$ é o período de amostragem.

O sinal no instante da nova amostragem pode ser escrito conforme mostrado em (2).

$$PF_{Signal_New} = K_p \cdot PF_{Error_New} + PF_{Integral_New} \quad (2)$$

Expandindo esta equação, o sinal pode ser expresso na forma recursiva como mostrado em (3).

$$PF_{Signal_New} = PF_{Signal_Old} + K_p (PF_{Error_New} - PF_{Error_Old}) + \frac{K_p}{T_i} \cdot CTRL_{Cycle} \cdot PF_{Error_New} \quad (3)$$

O controlador usa esta equação para atualizar seus sinais de controle de saída.

O controlador é implementado usando o texto estruturado da IEC 61131. O principal requisito de controle desta usina de geração consiste em manter um determinado fator de potência medido no POI. O fator de potência pode ser adiantado ou atrasado e pode ser alterado a partir do sistema IHM e SCADA.

O desempenho do sistema mostra que o fator de potência é mantido na faixa de 5 por cento do ponto de ajuste de referência sob condições normais [8].

VIII. EXEMPLO 3: CONTROLE DE EXPORTAÇÃO DE POTÊNCIA LIMITADA OU NÃO EXPORTAÇÃO E RESTRIÇÃO DE POTÊNCIA

A Fig. 1 ilustra uma visão simplificada de um sistema elétrico de potência de pequeno porte para uma cidade de tamanho reduzido. O sistema elétrico consiste de uma subestação e três alimentadores de 12,47 kV. Uma usina de geração FV de 3,5 MW é inserida na seção média do terceiro alimentador.

A Fig. 7 mostra a carga diária média da cidade. Ela exibe um perfil de carga típico de uma cidade residencial, onde a carga é pequena pela manhã, quando a maioria das pessoas está no trabalho, e começa a aumentar à tarde quando as pessoas chegam em casa. A carga normalmente atinge seu

pico ao anoitecer quando os moradores ligam ar-condicionado e outros eletrodomésticos.

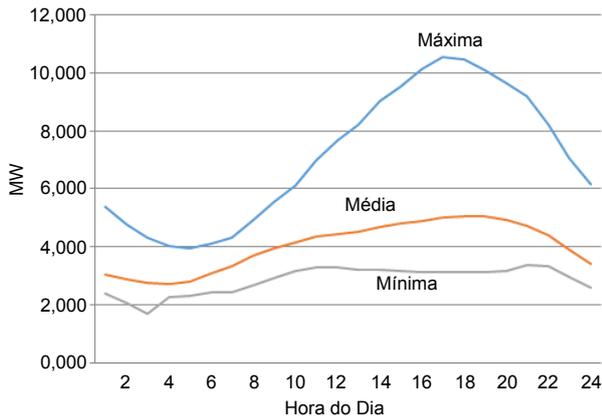


Fig. 7. Carga Diária Média

A Fig. 8 mostra a carga típica no decorrer do ano. Uma vez que esta cidade está localizada na Califórnia, a figura mostra que a carga é maior no verão do que em qualquer outra estação do ano. Os pequenos afundamentos repetidos na figura representam a carga nos fins de semana. Nesta área residencial particular, o consumo de energia durante os fins de semana parece ser menor do que durante os dias da semana.

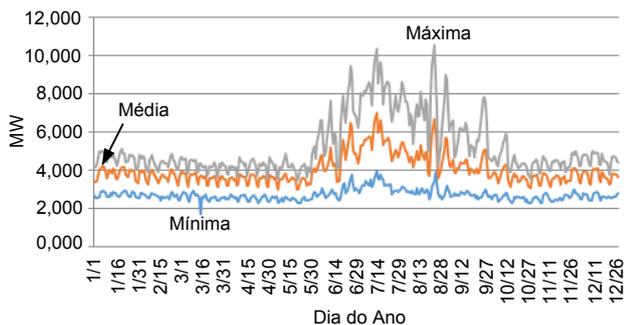


Fig. 8. Perfil de Carga Anual

Como as cargas mínimas diárias e dos fins de semana podem ser menores do que 3,5 MW, há uma grande possibilidade de que a potência seja exportada para a concessionária. Devido a esta preocupação, um dos principais requisitos de controle é uma condição de não exportação.

A interligação da usina de geração FV com o alimentador é feita através de um religador. A usina FV está localizada a cerca de 45 metros do religador e cerca de 3,2 quilômetros da subestação. Os principais componentes deste sistema são o controlador mestre, um controle do religador, um relé de proteção, sete inversores FV de 500 kW e um pequeno sistema IHM e SCADA local. O relé de proteção está localizado na subestação, fora da usina de geração FV.

Os requisitos do sistema de controle podem ser resumidos conforme indicado a seguir:

- Quando o relé detecta uma exportação de potência (a potência medida na subestação é menor do que zero), o sistema de controle tem de desconectar a usina de geração FV do alimentador dentro de 2 segundos.
- Quando o relé detecta uma condição de carga baixa (definida por um valor limite), o sistema de controle

tem de desligar todos os inversores. A razão para esta exigência é que toda vez que a geração FV é desconectada do alimentador, um operador precisa ir até a usina e fechar manualmente o religador. Isso pode ser demorado, podendo também depender da disponibilidade dos operadores.

- Quando o relé detecta uma carga mais baixa do que um segundo valor limite, que é conhecido como condição de restrição, o sistema de controle tem de reduzir a potência de saída dos inversores. De forma similar, cada vez que os inversores FV são desligados, eles levam minutos para aumentar sua produção. Operações on/off repetidas não apenas prejudicam o desempenho da planta, como também introduzem comportamentos similares ao efeito da nuvem que pode afetar negativamente a estabilidade da rede.
- O fator de potência medido no POI tem de ser mantido em um ponto de ajuste, e o ponto de ajuste pode ser alterado a partir do sistema IHM e SCADA local.

O sistema é composto de dois meios de comunicação que compartilham um controlador mestre comum. Uma rede de fibra óptica é criada entre os inversores FV e o controlador mestre. A segunda rede é um link de rádio entre o controlador mestre e a subestação. O controlador mestre se comunica com os inversores usando Modbus TCP/IP. O link de rádio possui três canais, um dos quais é usado para controle e outro para o sistema IHM e SCADA (local) da subestação. O canal de controle usa um protocolo de comunicação serial proprietário ponto-a-ponto de alta velocidade. O canal de coleta de dados utiliza o protocolo de comunicação serial Modbus RTU. Como o controlador mestre e o controlador do religador estão no mesmo gabinete, eles se comunicam via cabo de cobre serial usando um protocolo proprietário ponto-a-ponto de alta velocidade.

O controle do fator de potência é implementado conforme descrito anteriormente. O controlador de restrição de potência e não exportação é implementado como mostrado na Fig. 9. A quantidade de potência P é medida pelo relé na subestação. O relé é programado para gerar quatro bits de dados com base nos limites X1, X2, X3, e X4. Em seguida, os dados são enviados para o controlador mestre. Assim que o controlador recebe os dados, ele envia os sinais de controle conforme indicado a seguir:

- Em operação normal, a potência medida (P) está acima de X4.
- Se a potência medida cair para um valor igual ou menor do que X3, o controlador envia um comando de restrição para os inversores.
- Se a potência medida cair para um valor igual ou menor do que X2, o controlador envia um comando de desligamento para os inversores.
- Se a potência medida cair para um valor menor do que X1 (zero), o controlador envia um comando de trip para o controle do religador.
- Se a potência medida aumentar para um valor maior do que X4, o controlador envia um comando de aumento da potência para os inversores.

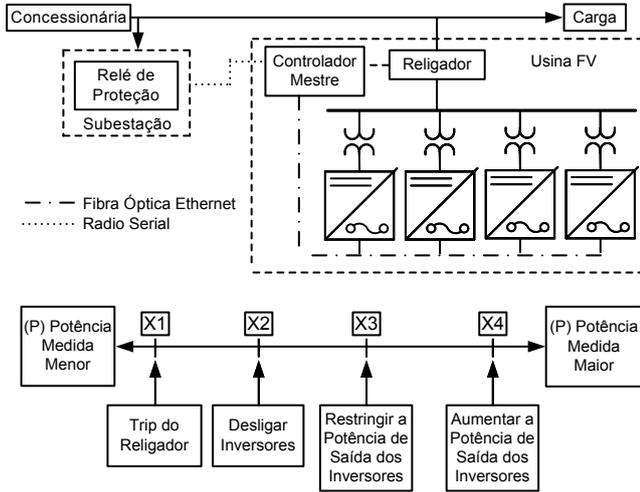


Fig. 9. Esquema de Controle de Não Exportação e Restrição de Potência

Nesta implementação, o sistema de controle impõe efetivamente a condição de não exportação efetuando inicialmente uma tentativa de restrição da saída dos inversores. Se isto falhar, ele tenta desligar os inversores. Se ambos falharem, o controlador desliga o religador como último recurso. O objetivo de ter os valores limites X3 e X4 consiste em permitir ajustes dinâmicos para a potência de saída do inversor visando compatibilizar com a carga. Embora estes dois limites tenham sido selecionados pela administração da cidade com base em dados históricos, eles não são ideais. Esta administração decidiu manter os limites selecionados e nenhuma otimização foi realizada.

A. Algoritmos de Restrição de Potência

1) Etapas Simples

O algoritmo mais simples de restrição de potência efetua imediatamente a redução da quantidade de potência para um valor fixo (por exemplo, 20 por cento [ou outro porcentual dependendo da aplicação] do valor nominal quando P cai abaixo de X3). Quando P aumenta para um valor maior do que X4, o controlador envia os comandos para elevar a saída até um valor máximo, conforme mostrado em (4).

$$\begin{aligned} P_{SP} &= P_{Max} \quad \text{if } P > X_4 \\ P_{SP} &= P_{Min} \quad \text{if } P < X_3 \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

P_{SP} é o ponto de ajuste da potência de saída enviado para os inversores.

$$P_{Min} = 0.2 \cdot P_{Max}.$$

Este algoritmo pode ser eficaz em aplicações onde a planta precisa reduzir rapidamente sua produção até um determinado valor. No entanto, a queda brusca na saída de potência da usina pode afetar negativamente o sistema de potência da área local dependendo da penetração de FV. Para evitar um aumento súbito da potência de saída, a taxa de rampa dos inversores pode ser usada para limitar a taxa de aumento. Combinando o algoritmo e a taxa de rampa, este esquema de restrição da potência pode ser utilizado em diversas aplicações.

2) Restrição Linear

Ao invés de reduzir a potência de saída em uma única etapa, a potência de saída pode ser reduzida de forma incremental em múltiplas etapas. Nesta implementação, o

algoritmo de restrição de potência segue uma equação linear, conforme mostrado em (5).

$$\begin{aligned} P_{SP} &= P_{SP} - 10 \frac{\text{kW}}{\text{s}} \cdot T_i \quad \text{if } P < X_3 \\ P_{SP} &= P_{SP} + 10 \frac{\text{kW}}{\text{s}} \cdot T_i \quad \text{if } P > X_4 \end{aligned} \quad (5)$$

onde:

T_i é o intervalo de tempo entre as mudanças consecutivas do ponto de ajuste de potência.

Neste exemplo, 10 kW por segundo é usado para aumentar ou reduzir a potência de saída. Como o controlador envia o ponto de ajuste periodicamente, a saída é submetida aos efeitos de múltiplas etapas, conforme mostrado na Fig. 10.

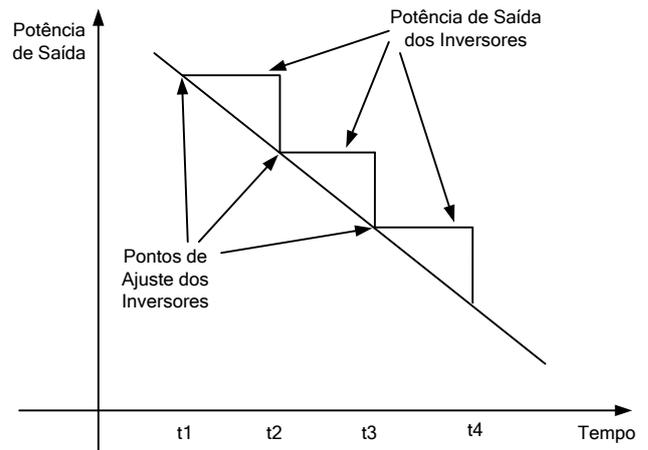


Fig. 10. Restrição de Potência Usando Equação Linear

Neste exemplo, os dois métodos de restrição de potência foram testados, mostrando que o algoritmo de etapas simples foi mais eficaz na redução rápida da potência de saída.

3) Outros Algoritmos

Dois outros algoritmos que podem ser considerados são equações não lineares para restrição e múltiplas taxas de rampa. O controlador pode usar uma equação de decaimento exponencial para a restrição, onde a saída reduz rapidamente no início e, em seguida, desacelera. A equação exponencial pode ser usada para o aumento da potência. O segundo algoritmo usa múltiplas taxas de rampa para alterar os pontos de ajuste da potência—um ajuste para aumento da potência e outro ajuste para redução da potência.

B. Potência de Exportação Limitada

Nos casos onde a potência de exportação é permitida, mas limitada, o mesmo algoritmo de controle pode ser usado para atender ao requisito, simplesmente alterando os limites programados no relé de proteção. O valor limite X1 é a potência de exportação máxima permitida no sistema, sendo um valor negativo quando a potência importada for considerada como positiva.

IX. EXEMPLO 4: CONTROLE DO RASTREADOR SOLAR E CONTROLE DE ETAPAS SEQUENCIAIS

Considere uma instalação de geração FV de 20 MW similar àquela descrita no Exemplo 1. Os módulos FV são montados em uma estrutura com rastreadores solares de

eixo único ao invés de uma estrutura fixa. Além disso, a planta está conectada a dois ramais independentes do sistema de potência e possui um gerador no local.

Os requisitos de controle para esta instalação são os seguintes:

- Recolher todos os rastreadores quando houver ventos fortes.
- Posicionar todos os rastreadores em ângulos pré-definidos. Um deles é o ângulo para a limpeza dos módulos FV.
- Desligar o inversor FV e colocar todos os rastreadores na posição recolhida (stowed) quando a planta for submetida a uma interrupção de energia. Este é o requisito para chavear toda a planta para um estado pré-determinado ou conhecido. Quando os inversores são desligados, eles têm de ser religados manualmente a partir do sistema IHM e SCADA.

Nesta aplicação, os rastreadores solares são divididos em dez zonas, onde cada plataforma é uma zona. Cada zona possui 26 controladores individuais, e cada controlador gerencia um número pré-determinado de módulos FV. Para que o controlador mestre possa se comunicar com um número gerenciável de dispositivos, um controlador lógico programável (CLP) é usado em cada zona. Neste caso, o controlador mestre se comunica com dez CLPs e os CLPs se comunicam com os controladores dos rastreadores individuais. No entanto, como o controlador mestre precisa ser capaz de controlar os controladores dos rastreadores individuais como um requisito de controle, o controlador mestre precisa enviar 26 comandos para os CLPs. Conforme discutido anteriormente, dados discretos estão sendo trocados entre o controlador mestre e os CLPs.

Um esquema de controle de Malha fechada é usado para recolher os rastreadores quando ocorrem ventos fortes. Para posicionar os rastreadores em um ângulo pré-definido, o controlador mestre envia um bit de dados para todos os 260 controladores dos rastreadores.

A lógica de controle descrita brevemente nas Seções II e IV coloca toda a planta em um estado conhecido após uma interrupção de energia. O fluxograma da Fig. 11 ilustra uma sequência de etapas simplificada. Neste exemplo, parte da lógica que normalmente reside no controlador mestre foi transferida para os relés de proteção. Conforme mostrado no diagrama, os relés de proteção são responsáveis por qual fonte secundária está disponível e o controlador mestre assume que sempre há uma fonte secundária disponível. Esta pode ser o segundo ramal da rede elétrica ou o gerador local. Os testes mostraram que o controle de malha fechada combinado com o controle de etapas sequenciais atende aos requisitos de controle.

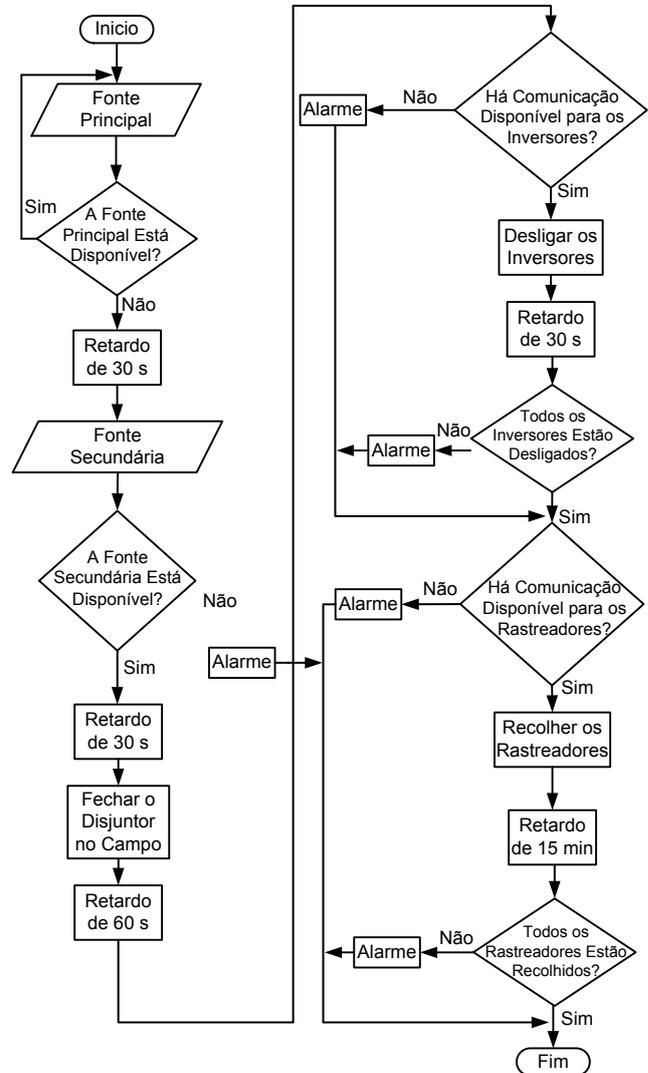


Fig. 11. Fluxograma Simplificado para Desligar os Inversores e Recolher os Rastreadores

X. CONCLUSÃO

As usinas de geração solar FV continuam a surgir e podem impactar enormemente as redes elétricas nas quais estão sendo integradas. Como resultado, está se tornando cada vez mais importante implantar esquemas de controle para resolver os desafios práticos associados à interligação de instalações FV de grande porte com o sistema de potência da concessionária. As necessidades da interconexão, tamanho e localização da planta, juntamente com as práticas operacionais da concessionária, geram a necessidade de desenvolver uma solução flexível e configurável para ajudar e facilitar a integração destes recursos renováveis. A solução do sistema de controle proposto neste artigo atua como uma interface única de comunicação com sistemas internos e externos, reduzindo as cargas das comunicações e fornecendo ao mesmo tempo a funcionalidade necessária para atender a uma ampla faixa de requisitos de controle. Este artigo fornece uma discussão de diferentes técnicas de controle utilizadas em conjunto com os equipamentos da usina FV, apresentando alguns dos recursos disponíveis e demonstrando como superar os desafios das usinas de geração distribuída.

XI. REFERÊNCIAS

- [1] Y. T. Tan and D. S. Kirschen, "Impact on the Power System of a Large Penetration of Photovoltaic Generation," proceedings of the 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, June 2007.
- [2] K. De Brabandere, A. Woyte, R. Belmans, and J. Nijs, "Prevention of Inverter Voltage Tripping in High Density PV Grids," proceedings of the 19th Annual Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, June 2004.
- [3] J. Bank, B. Mather, J. Keller, and M. Coddington, "High Penetration Photovoltaic Case Study Report," *National Renewable Energy Laboratory*, January 2013. Available: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/54742.pdf>.
- [4] R. Tonkoski, L. A. C. Lopes, and T. H. M. El-Fouly, "Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 2, Issue 2, April 2011, pp. 139–147.
- [5] K. Turitsyn, P. Sulc, S. Backhaus, and M. Chertkov, "Distributed Control of Reactive Power Flow in a Radial Distribution Circuit With High Photovoltaic Penetration," proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, MN, July 2010, pp. 1–6.
- [6] S. Eftekharijad, V. Vittal, G. T. Heydt, B. Keel, and J. Loehr, "Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, Issue 2, May 2013, pp. 893–901.
- [7] M. Mills-Price, M. Rourke, and D. Kite, "Adaptive Control Strategies and Communications for Utility Integration of Photovoltaic Solar Sites," proceedings of the 2014 Power and Energy Automation Conference, Spokane, WA, March 2014.
- [8] D. Taggart, K. Hao, R. Jenkins, and R. VanHatten, "Power Factor Control for Grid-Tied Photovoltaic Solar Farms," proceedings of the 14th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, March 2012.
- [9] "Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art," *IEA International Energy Agency*, October 2013. Available: <http://www.iea-pvps.org>.
- [10] A. Kassem and M. Hamad, "A Microcontroller-Based Multi-Function Solar Tracking System," proceedings of the 2011 IEEE International Systems Conference, Montreal, QC, April 2011, pp. 13–16.
- [11] IEC 82/618/NP, Specification for Solar Trackers Used for Photovoltaic Systems.
- [12] N. C. Seeley, "Automation at Protection Speeds: IEC 61850 GOOSE Messaging as a Reliable, High-Speed Alternative to Serial Communications," proceedings of the 10th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, April 2008.
- [13] K. T. Erickson, *Programmable Logic Controllers: An Emphasis on Design and Application*. Dogwood Valley Press, LLC, Rolla, MO, 2005.
- [14] K. J. Åström and R. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, 2008.

XII. BIOGRAFIAS

Michael Mills-Price é o líder de desenvolvimento em tecnologia da unidade de negócios de energia solar na Advanced Energy Industries, Inc. Ele é o projetista principal responsável por trazer novas tecnologias para o mercado e continua a liderar equipes na área de controle de sistemas avançados visando ampliar o escopo e diminuir os impactos associados à adoção em larga escala da energia fotovoltaica. Michael recebeu seu diploma e mestrado em engenharia elétrica da Oregon State University (OSU), é um engenheiro profissional registrado e membro ativo do IEEE. Ele é também professor adjunto da OSU, ministrando cursos de sistemas de distribuição de energia e armazenamento de energia em nível sênior.

Kei Hao recebeu seu Ph.D em engenharia elétrica da University of Wisconsin–Madison, seu M.S.E.E. da University of Wisconsin–Milwaukee, e seu B.S.E.E. da La Universidad de la Republica, Uruguai. Ele tem experiência nas áreas de sistemas de automação e controle, sistemas de comunicação sem fio e proteção e automação do sistema de potência. Em 2010, ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro na divisão de serviços de engenharia. Ele é membro do IEEE, um engenheiro profissional registrado no estado da Califórnia, é autor e apresentou vários artigos técnicos.