



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO LUCAS AVELAR LEMOS

**ANÁLISE DE MODELOS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES
DISTRIBUÍDOS NA VIABILIZAÇÃO DO ILHAMENTO
INTENCIONAL**

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

JOÃO LUCAS AVELAR LEMOS

**ANÁLISE DE MODELOS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES
DISTRIBUÍDOS NA VIABILIZAÇÃO DO ILHAMENTO
INTENCIONAL**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Rogério Lúcio Lima

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L557a Lemos, João Lucas Avelar.

Análise de modelos de excitação de geradores distribuídos na viabilização doilhamento intencional [recurso eletrônico] / João Lucas Avelar Lemos. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 19 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Rogério Lúcio Lima.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Geração distribuída, desbalanço de potência, gerador síncrono, ilhamento, simulação dinâmica, sistema de excitação. I. Lima, Rogério Lúcio, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.102281/2022-55

Interessado: ROGERIO LUCIO LIMA, JOAO LUCAS AVELAR LEMOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA:

ANÁLISE DOS DOS MODELOS EXCITAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS NA VIABILIDADE DO ILHAMENTO INTENCIONAL.

ALUNO: JOÃO LUCAS AVELAR LEMOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 14 de dezembro de 2022.

Nota: 9,50.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Lúcio Lima

Orientador

Prof. Dr. Fillipe Matos de Vasconcelos

Examinadora

Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques

Examinador



Documento assinado eletronicamente por **ROGERIO LUCIO LIMA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 15/12/2022, às 04:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO LUCAS AVELAR LEMOS, Usuário Externo**, em 15/12/2022, às 08:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FILLIPE MATOS DE VASCONCELOS, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/12/2022, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO TOLOMEU MARQUES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 21/12/2022, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5358097** e o código CRC **ECE5EE7C**.

Referência: Processo nº 23108.102281/2022-55

SEI nº 5358097

RESUMO

LEMOS, J.L.A de. **ANÁLISE DE MODELOS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS NA VIABILIZAÇÃO DO ILHAMENTO INTENCIONAL**. 2022. 19f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2022.

O objetivo deste documento é aplicar uma metodologia de viabilização da operação isolada de um gerador síncrono distribuído, no suprimento de uma região após a falta da concessionária. Isso será possível através da escolha de um método de excitação que evite a desconexão do gerador pelas proteções no ponto de acoplamento comum entre a geração distribuída e a rede da concessionária durante o transitório da operação em paralelo para a operação isolada, em que o gerador passará a controlar toda a tensão e frequência para as cargas. Para viabilizar a escolha da excitação serão construídas curvas que relacionam o tempo de detecção da operação isolada, com o período necessário para que as proteções desconectem o gerador em função da diferença entre a potência gerada e consumida. Com isso, será possível obter uma metodologia que indique qual a excitação mais praticável na manutenção do fornecimento de energia para as cargas evitando assim apagões locais.

Palavras-chave: Geração distribuída, desbalanço de potência, gerador síncrono, ilhamento, simulação dinâmica, sistema de excitação.

ABSTRACT

The aim of this document is to apply a methodology for the viability of the isolated operation of a distributed synchronous generator in the supply of a region after the failure of the utility. This will be possible through the choice of an excitation method that avoids the disconnection of the generator by the protections at the common coupling point between distributed generation and the utility's grid during the transient from parallel operation to isolated operation, in which the generator will control the entire voltage and frequency for the loads. To make the choice of excitation feasible, curves will be constructed relating the time of detection of isolated operation to the period required for the protections to disconnect the generator depending on the difference between generated and consumed power. With this, it will be possible to obtain a methodology that indicates the most practical excitation in maintaining the supply of energy to the loads, thus avoiding local blackouts.

Keywords: Distributed generation, dynamic simulation, excitation system, islanding, power imbalance, synchronous generator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Fig. 1. Diagrama de blocos geral para o controle de excitação de máquinas síncronas.....	16
Fig. 2. Arquitetura da excitação DC1A.	16
Fig. 3. Arquitetura da excitação ST1A.	16
Fig. 4. Diagrama unifilar do Sistema elétrico usado.	17
Fig. 5. Curva de desempenho com déficit de P_g para a excitação DC1A.	17
Fig. 6. Curva de desempenho com excesso de P_g para a excitação ST1A.	17
Fig. 7. Regiões de segurança e desbalanço de potência crítica P_g para a excitação ST1A....	18
Fig. 8. Curva de restrição com déficit de P_g para a excitação DC1A.	18
Fig. 9. Curva de restrição com excesso de P_g para a excitação ST1A.	18
Fig. 10. Fluxograma para a metodologia combinada.	18
Fig. 11. Metodologia combinada para déficit de potência gerada para ST1A.	18
Fig. 12. Metodologia combinada para excesso de potência gerada para ST1A.	18
Fig. 13. Metodologia combinada para déficit de potência gerada para DC1A.	19
Fig. 14. Metodologia combinada para excesso de potência gerada para DC1A.	19
Fig. 15. Definição da metodologia combinada.	19

LISTA DE TABELAS

Tabela I Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Déficit de Geração para ST1A.	19
Tabela II Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Excesso de Geração para ST1A.	20
Tabela III Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Déficit de Geração para DC1A.....	20
Tabela IV Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Excesso de Geração para DC1A.....	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DPA	Desbalanço de Potência Ativa
GD	Gerador Distribuído
GSD	Gerador Síncrono Distribuído
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PG	Potência Gerada
QEE	Qualidade de Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

V_c	Tensão de saída da excitação DC1A.
V_{ref}	Tensão de referência da excitação DC1A.
V_s	Realimentação positiva da excitação DC1A.
V_f	Realimentação negativa da excitação DC1A.
V_{ref}	Tensão de referência da excitação DC1A.
V_s	Realimentação positiva da excitação DC1A.
ΔP	Desbalanço de potência.
ΔP_c	Desbalanço de potência crítica.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	15
II. SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	16
III. CURVAS DE DESEMPENHO E RESTRIÇÃO	17
IV. METODOLOGIA COMBINADA.....	18
V. CONCLUSÕES	20

ANÁLISE DE MODELOS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS NA VIABILIZAÇÃO DO ILHAMENTO INTENCIONAL

João Lucas Avelar Lemos

UFMT, FAET/Engenharia Elétrica, Cuiabá – MT, joaolucas21300@gmail.com

Resumo - O objetivo deste documento é aplicar uma metodologia de viabilização da operação isolada de um gerador síncrono distribuído, no suprimento de uma região após a falta da concessionária. Isso será possível através da escolha de um método de excitação que evite a desconexão do gerador pelas proteções no ponto de acoplamento comum entre a geração distribuída e a rede da concessionária durante o transitório da operação em paralelo para a operação isolada, em que o gerador passará a controlar toda a tensão e frequência para as cargas. Para viabilizar a escolha da excitação serão construídas curvas que relacionam o tempo de detecção da operação isolada, com o período necessário para que as proteções desconectem o gerador em função da diferença entre a potência gerada e consumida. Com isso, será possível obter uma metodologia que indique qual a excitação mais praticável na manutenção do fornecimento de energia para as cargas evitando assim apagões locais.

Palavras-Chave – Geração distribuída, desbalanço de potência, gerador síncrono, ilhamento, simulação dinâmica, sistema de excitação.

ANALYSIS OF GENERATOR EXCITATION MODELS ON ENABLING INTENTIONAL ISLANDING ON ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

Abstract - The aim of this document is to apply a methodology for the viability of the isolated operation of a distributed synchronous generator in the supply of a region after the failure of the utility. This will be possible through the choice of an excitation method that avoids the disconnection of the generator by the protections at the common coupling point between distributed generation and the utility's grid during the transient from parallel operation to isolated operation, in which the generator will control the entire voltage and frequency for the loads. To make the choice of excitation feasible, curves will be constructed relating the time of detection of isolated operation to the period required for the protections to disconnect the generator depending on the difference between generated and consumed power. With this, it will be possible to obtain a methodology that indicates the most practical excitation in maintaining the supply of energy to the loads, thus avoiding local blackouts.

Keywords - Distributed generation, dynamic simulation, excitation system, islanding, power imbalance, synchronous generator.

NOMENCLATURA

V_c	Tensão de saída da excitação DC1A.
V_{ref}	Tensão de referência da excitação DC1A.
V_s	Realimentação positiva da excitação DC1A.
V_f	Realimentação negativa da excitação DC1A.
V_{ref}	Tensão de referência da excitação DC1A.
V_s	Realimentação positiva da excitação DC1A.
ΔP	Desbalanço de potência.
ΔP_c	Desbalanço de potência crítica.

I. INTRODUÇÃO

As novas das cargas instaladas, juntamente com a ligação de geradores distribuídos (GD) na rede tem aumentado a fragilidade do sistema elétrico, deixando-o cada vez mais suscetível a distúrbios e desligamentos inesperados [1]. Assim, cenários como a desconexão do sistema elétrico da área metropolitana de Nova Orleans nos Estados Unidos em 2008 em decorrência do furacão Gustav, fizeram com que toda a região ficasse isolada, sendo sustentada por GDs, até que a conexão com a rede principal fosse recuperada [2]. Dessa forma, o conceito de ilhamento caracteriza o momento que os geradores distribuídos passam a sustentar eletricamente uma região durante o período de falta da rede de alimentação [3].

No instante do ilhamento, os geradores síncronos distribuídos (GSD) experimentam uma súbita diferença entre a potência gerada e a potência demandada pela carga, o que causa oscilações no eixo mecânico que impactam diretamente não só na qualidade de energia para carga, mas também na estabilidade do sistema quando exposto ao novo modo de controle. Assim, em meio a grandes perturbações, caso o gerador não consiga manter a estabilidade transitória; ele será desconectado pelas proteções no ponto de acoplamento comum (PAC) com a rede de distribuição [4]. Por outro lado, a medição da variação da frequência de um gerador no momento do ilhamento é capaz de demonstrar a viabilidade técnica da operação isolada, pois está diretamente relacionada ao desbalanço de potência ativa (DPA), ou seja, a diferença entre a potência ativa gerada e a potência ativa consumida [5].

Assim, o estudo dos métodos de excitação de geradores síncronos evita a perda de sincronismo da máquina durante variações bruscas da carga, mitigando oscilações de tensão e frequência, através da injeção de corrente DC nos enrolamentos de campo e consequentemente reduzindo a probabilidade de desconexão do GSD [6]. É importante que, a mudança para a operação isolada seja rápida o bastante para evitar problemas de qualidade de energia e afundamentos de tensão, e devagar o suficiente para evitar falsas atuações e até desgaste prematuro da máquina [7].

Desse modo, este trabalho visa abordar o ilhamento de um sistema de distribuição de energia com 6 barras suprido por

um gerador síncrono quando isolado da rede. A análise será feita mediante a metodologia combinada desenvolvida por [5] para a escolha dos ajustes dos relés de detecção e proteção através da sobreposição das curvas de desempenho e restrição de um gerador síncrono para duas formas de excitação. A partir disso, será possível identificar qual a excitação mais indicada para viabilizar o ilhamento para um determinado arranjo de carga ou topologia da rede.

II. SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E MODELOS DE SIMULAÇÃO

O sistema de excitação de um gerador síncrono ligado a uma rede de distribuição, visa garantir a estabilidade da tensão e frequência para a carga por meio da injeção de corrente nos enrolamentos de campo [8]. De modo geral, como mostrado na figura 1, a excitação é composta por transdutores de tensão, compensadores de carga e estabilizadores de potência. O transdutor converte a leitura de tensão na saída para que ela seja interpretada por um regulador automático de tensão que, proporcionalmente ao desvio medido, controla a excitação do gerador, simultaneamente, o compensador de carga mitiga oscilações no eixo e o estabilizador garante que as os limites físicos do sistema não sejam violados.

Existem 3 principais tipos de excitação empregados atualmente nos geradores síncronos são [9]:

- Tipo DC, injeta corrente contínua diretamente nos enrolamentos de campo através de um gerador DC ligado ao eixo do gerador síncrono.
- Tipo AC, possui um gerador AC ligado ao eixo do gerador síncrono que posteriormente passa por um retificador de potência e injeta corrente DC nos enrolamentos de campo.
- Tipo ST, neste caso, a corrente é gerada pelo próprio enrolamento do estator do gerador, sem a necessidade de um gerador externo. A intensidade da corrente é controlada por um sistema de regulação automático, para manter a tensão gerada pelo gerador síncrono constante.

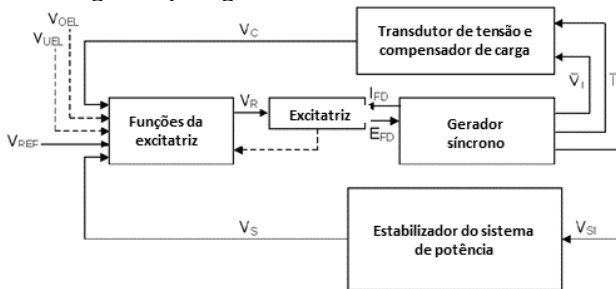


Fig. 1. Diagrama de blocos geral para o controle de excitação de máquinas síncronas adaptado de [9].

Este trabalho é baseado na comparação de dois tipos de excitação, de modo que, a metodologia desenvolvida permitirá estender o estudo para as demais existentes. Logo as excitações que serão abordadas foram obtidas em [9] e suas características seguem abaixo:

- Tipo DC1A, é mostrado na figura 2, é largamente implementada nas indústrias e seu funcionamento se dá através de um campo controlado através de comutador DC que compara um sinal de tensão na saída (V_C) com a tensão

de referência (V_{ref}) juntamente com as realimentações V_s e V_f que quando V_C está próximo de V_{ref} , ambos tendem a zero. Dessa forma, permitindo que o regulador de tensão injete corrente contínua nos enrolamentos de campo afim de garantir a tensão nominal na saída do gerador síncrono.

- Tipo ST1A, é mostrado na figura 3, usa a potência proveniente de um transformador externo, para suprir proporcionalmente o sinal de entrada de um retificador controlado em que o sinal enviado ao regulador de tensão é diretamente proporcional a tensão de saída do gerador síncrono. Com isso, as constantes envolvidas são muito pequenas de forma que o que permite o sistema se estabilizar para grandes variações, é o valor expressivo das constantes de tempo que diminuem o ganho do sistema no decorrer da atuação, a fim de mitigar oscilações no eixo e entregar a tensão nominal do gerador.

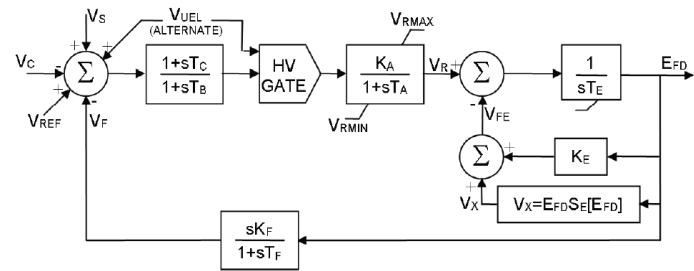


Fig. 2. Arquitetura da excitação DC1A [9].

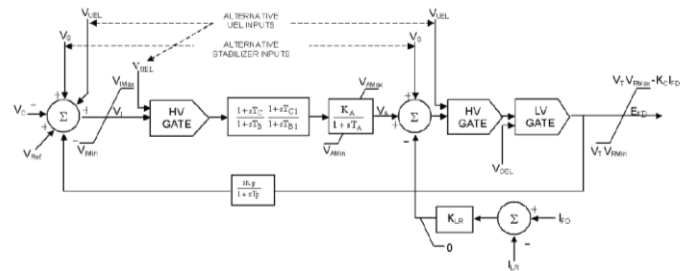


Fig. 3. Arquitetura da excitação ST1A [9].

Para a realização das simulações utilizou-se uma extensão do Matlab/Simulink chamada SimPowerSystems a qual fornece bibliotecas de componentes e parâmetros, juntamente com ferramentas de modelagem para criação de sistemas elétricos [10].

Assim, usando como base o sistema proposto por [11], o qual recria no SimPowerSystems um sistema de distribuição de 132 kV/33kV e 60 Hz alimentando 6 barras com carga total de 20 MVA e fator de potência de 0,95 indutivo apresentado na figura 4. Para a simulação do ilhamento é feita a abertura do disjuntor CB1. O gerador síncrono quando ilhado supre a potência ativa e reativa, de modo que caso esteja dentro da sua capacidade, o sistema de excitação empregado deverá auxiliar a manter a tensão e a frequência constantes na carga durante o momento de transição da operação paralela com a rede para a operação ilhada evitando que o GSD seja desconectado da rede devido a uma brusca variação de frequência.

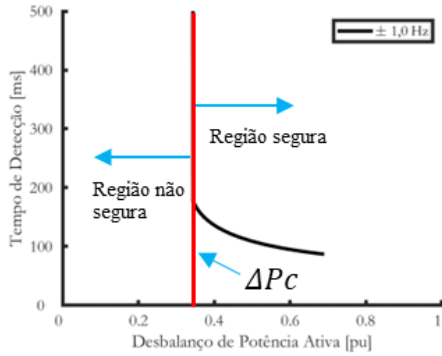


Fig. 7. Regiões de segurança e desbalanço de potência crítica PG para a excitação ST1A.

Já as figuras 8 e 9 apresentam as curvas de restrição para déficit e excesso de potência gerada para as excitações DC1A e ST1A, respectivamente. Dessa forma, é perceptível que quanto maior o DPA, menor é o tempo disponível para realizar a mudança dos modos de controle, porém quanto menor o desbalanço, maior é o tempo de restrição. Esse cenário é compreensível uma vez que, se o DPA é muito grande, a mudança do modo de controle PQ para V-f deve ocorrer mais rapidamente a fim de não ativar as proteções no PAC, analogamente, quando o desbalanço é pequeno, há uma margem de tempo maior para realizar a mudança sem interferir na QEE.

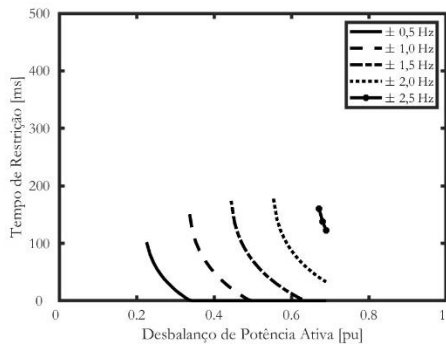


Fig. 8. Curva de restrição com déficit de PG para a excitação DC1A.

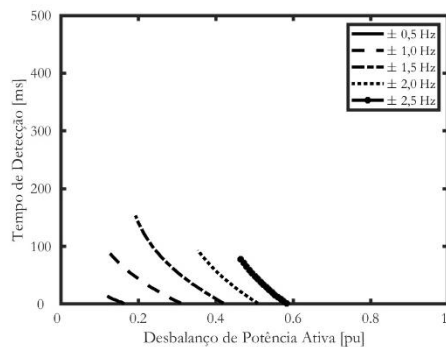


Fig. 9. Curva de restrição com excesso de PG para a excitação ST1A

IV. METODOLOGIA COMBINADA

A partir das curvas de desempenho e restrição obtidas, para que o ilhamento de um gerador tenha maior probabilidade de sucesso sem atuação das proteções, é preciso que o tempo de

detecção seja menor que o tempo de mudança do modo de controle PQ para V-f, como mostrado na figura 10 [5]. Com isso, caso o tempo de restrição seja menor que o tempo de detecção, o gerador será desconectado pelas proteções antes mesmo de ser detectado e posteriormente realizar os ajustes nos modos de controle, uma vez que, os relés de medida de frequência são influenciados diretamente com o desbalanço de potência ativa [5].

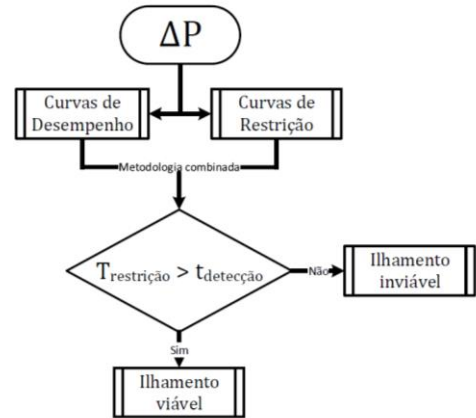


Fig. 10. Fluxograma para a metodologia combinada [5].

As figuras 11 a 14 mostram o método gráfico aplicado tanto para o cenário de déficit, quanto de excesso de potência gerada para as excitações ST1A e DC1A. Com isso, a análise que deve ser feita é baseada na escolha do ajuste dos relés de sub e sobre frequência das curvas de restrição e desempenho de modo a satisfazer a condição de tempo de restrição ser maior que o tempo de detecção.

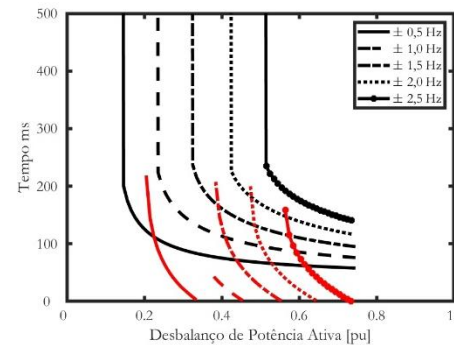


Fig. 11. Metodologia combinada para déficit de potência gerada para ST1A.

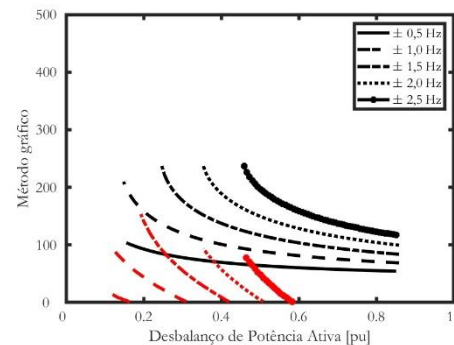


Fig. 12. Metodologia combinada para excesso de potência gerada para ST1A.

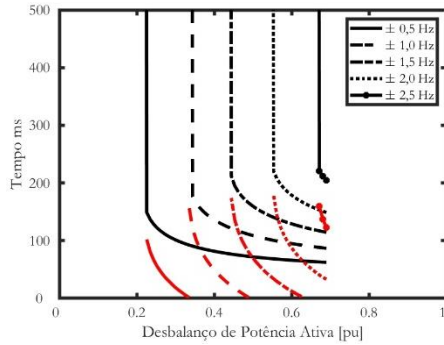


Fig. 13. Metodologia combinada para déficit de potência gerada para DC1A.

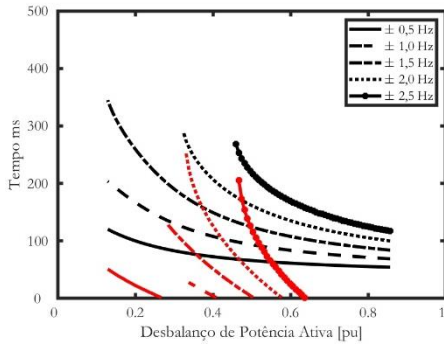


Fig. 14. Metodologia combinada para excesso de potência gerada para DC1A.

Logo, a excitação escolhida será a que apresentar a maior quantidade de cenários que o ilhamento é viável, ou seja, a operação isolada terá maior probabilidade de ocorrer para um intervalo maior de desbalanços de potência. Tendo em vista a figura 15, a partir de um desbalanço crítico de potência obtido pela sobreposição das curvas de 36,34%, é possível dividir a análise em dois cenários, o primeiro quando o desbalanço é menor que 36,34% de modo que o tempo de restrição é maior que o tempo de detecção e o ilhamento é viável, e o segundo cenário ocorre quando o desbalanço é maior que 36,34% e o tempo de restrição passa a ser menor que o tempo de detecção, com isso, a mudança dos modos de controle não irá ocorrer e as proteções desconectarão o gerador, dessa forma inviabilizando o ilhamento.

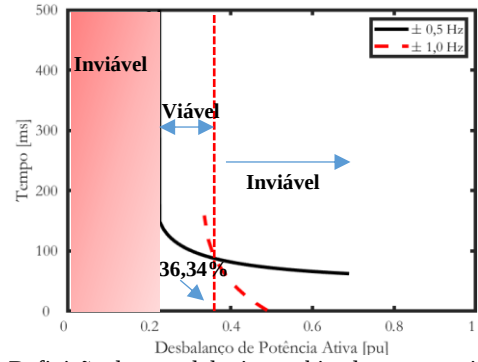


Fig. 15. Definição da metodologia combinada para um ajuste de curva de restrição de $\pm 0,5\text{Hz}$ e da curva de desempenho para $\pm 1,0\text{Hz}$.

Com as tabelas 1 a 4 são feitas as sobreposições das curvas de restrição com as curvas de desempenho para déficit e excesso de potência gerada referente a cada tipo de excitação. As tabelas são construídas a partir da sobreposição das curvas, de modo que, quando ela existe, há seletividade entre as configurações, possibilitando definir um valor de desbalanço de potência crítica através do valor da abscissa no ponto de cruzamento entre a curva de restrição e desempenho.

De modo geral analisando as tabelas, percebe-se que o gerador síncrono ligado ao sistema de distribuição, quando operando com a excitação do tipo DC1A apresenta 18 combinações de ajustes que permitem viabilizar o ilhamento, ao passo que quando utiliza a excitação ST1A apresenta 15 casos favoráveis ao ilhamento. Porém, é interessante salientar que caso o sistema seja posto em uma situação de déficit de potência gerada, para DC1A existem 9 combinações viáveis, enquanto para ST1A existem 12, e para excesso de potência gerada, DC1A possui 9 combinações viáveis e ST1A apenas 3.

Portanto para a escolha da excitação é importante conhecer a natureza da carga para que assim seja possível estimar a faixa de valores do desbalanceamento de potência juntamente com a sensibilidade para oscilações de frequência. Assim, em meio a uma situação de ilhamento intencional não programado a escolha correta da excitação irá auxiliar muito na manutenção da QEE durante o transitório além de viabilizar mais cenários em que o ilhamento é bem-sucedido.

Tabela I Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Déficit de Geração para ST1A.

		Curvas de desempenho									
		Ajustes (Hz) e ΔPC (%)									
Curvas de restrição (Hz)		±0.5	ΔPC	±1.0	ΔPC	±1.5	ΔPC	±2.0	ΔPC	±2.5	ΔPC
	±0.5	sim	22,49%	Não	----	Não	----	----	----	Não	
	±1.0	Não	----	Não	----	Não	----	----	----	Não	
	±1.5	sim	43,43%	sim	40,93%	sim	38,93%	----	----	Não	
	±2.0	sim	52,42%	sim	50,42%	sim	48,42%	sim	48,02%	Não	
	±2.5	sim	61,43%	sim	59,42%	sim	57,42%	sim	56,97%	Não	

Tabela II Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Excesso de Geração para ST1A.

	Curvas de desempenho										
	Ajustes (Hz) e ΔPC (%)										
Curvas de restrição (Hz)		±0.5	ΔPC	±1.0	ΔPC	±1.5	ΔPC	±2.0	ΔPC	±2.5	ΔPC
	±0.5	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±1.0	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±1.5	sim	25,89%	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±2.0	sim	37,63%	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±2.5	sim	47,94%	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----

Tabela III Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Déficit de Geração para DC1A.

	Curvas de desempenho										
	Ajustes (Hz) e ΔPC (%)										
Curvas de restrição (Hz)		±0.5	ΔPC	±1.0	ΔPC	±1.5	ΔPC	±2.0	ΔPC	±2.5	ΔPC
	±0.5	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±1.0	sim	33,51%	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±1.5	sim	45,34%	sim	44,43%	Não	----	Não	----	Não	----
	±2.0	sim	57,16%	sim	55,34%	sim	55,34%	Não	----	Não	----
	±2.5	sim	68,99%	sim	68,08%	sim	67,17%	Não	----	Não	----

Tabela IV Desbalanço Crítico de Potência do Relé de Sub/Sobre Frequência com Excesso de Geração para DC1A.

	Curvas de desempenho										
	Ajustes (Hz) e ΔPC (%)										
Curvas de restrição (Hz)		±0.5	ΔPC	±1.0	ΔPC	±1.5	ΔPC	±2.0	ΔPC	±2.5	ΔPC
	±0.5	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±1.0	sim	26,22%	Não	----	Não	----	Não	----	Não	----
	±1.5	sim	28,13%	sim	33,41%	Não	----	Não	----	Não	----
	±2.0	sim	40,19%	sim	36,62%	sim	33,77%	Não	----	Não	----
	±2.5	sim	55,33%	sim	48,15%	sim	46,70%	Não	----	Não	----

V. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo compreender como a escolha da forma de excitação de um gerador síncrono distribuído, pode auxiliar na viabilização do seu ilhamento intencional não planejado por meio da redução dos transitórios de tensão e frequência após a detecção e posterior mudança do modo de operação PQ para fV. Isso foi possível por meio do estudo das características das curvas de desempenho e restrição para cada tipo de excitação [4, 15]. Logo, utilizou-se a metodologia combinada proposta por [5], ou seja, sobrepor as curvas de desempenho e restrição para situações de déficit e excesso de potência gerada e com isso construir tabelas que relacionem ambas as curvas a fim de encontrar as

combinações que possibilitem o ilhamento juntamente com o conhecimento do desbalanço crítico de potência para cada combinação viável. Por tanto, um dos indicativos de escolha da excitação mais adequada, é aquela que apresenta o maior número de combinações positivas (“Sim”) nas tabelas geradas. Com isso, o ilhamento poderá ser viável para uma faixa maior de valores de desbalanço de potência, o que permite mais variações da carga na região ilhada, reduz a probabilidade de desconexão pelas proteções no PAC e aproxima as simulações de uma situação real, uma vez que é imprevisível qual será o estado da carga no momento de falta da concessionária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.R.H Ahangar, G.B. Gharehpetian, H.R. Baghaee, "A review on intentional controlled islanding in smart power systems and generalized framework for ICI in microgrids", *IEEE Transactions on*
- [2] S. Kolluri, S. Mandal, F. Galvan, and M. Thomas, "Island formation in entergy power grid during Hurricane Gustav," 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/PES.2009.5275340.
- [3] TRINDADE, F. C. L. "Análise dos sistemas de proteção e controle de instalações industriais com geradores síncronos durante operação ilhada". Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2009.
- [4] KUNDUR, P. "Power system stability and control". [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. v. 7.
- [5] LIMA, R. L. Metodologias para Determinar a Viabilidade Técnica do Ilhamento Intencional de Geradores Distribuídos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018
- [6] PADIYAR, K.R. "Power system dynamic stability and control". 2008. v. 2.
- [7] F. C. L. Trindade, P. C. M. Meira, W. Freitas, and J. C. M. Vieira, "Control systems analysis of industrial plants with synchronous generators during islanded operation," IEEE PES General Meeting, 2010, pp. 1-8, doi: 10.1109/PES.2010.5589547.
- [8] MORAIS, A. P. Avaliação do Desempenho dos Métodos de Proteção Contra a Perda de Excitação em Geradores Síncronos: Uma Contribuição Utilizando a Teoria dos Conjuntos Nebulosos. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Caarina, 2008
- [9] IEEE Std 421.5. Ieee recommended practice for excitation system models for power system stability studies. IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005), p. 1–207, Aug 2016.
- [10] HYDRO-QUÉBEC. 5.1, for Use with Simulink, User's Guide 2009. Natick, MA: TheMathWorks. 2009. Disponível em: <http://www.mathworks.com>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [11] Walmir F., Wilsun X., Zhenyu H., Jose C.M. Characteristics of vector surge relays for distributed synchronous generator protection. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, 77 (2007) 170–180
- [12] Y. An, D. Liu, G. Yan and J. Yong, "An Improved Intentional Islanding Strategy in Distribution Network with Hierarchical Control," 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586545.
- [13]. Ieee application guide for ieee std 1547(tm), ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. IEEE Std 1547.2-2008, p. 1–217, April 2009.
- [14] CORRÊA, D. S. Metodologias Para Análise Do Risco De Ocorrência De Ilhamentos Não Intencionais De Geradores Síncronos Distribuídos. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual De Campinas, 2008
- [15] Júnior, C. M. V. Metodologias para Ajuste e Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos. Dissertação (Doutorado) — Universidade Estadual De Campinas, 2006