



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS E ENERGIA

Lana Gabriella Souza Lopes

**Proposta de um sistema discreto de controle de
velocidade de um gerador de indução operando em
paralelo com um gerador síncrono para se evitar aumento
de frequência do sistema no caso de suprimento de cargas
reduzidas**

Itajubá

2021

Lana Gabriella Souza Lopes

**Proposta de um sistema discreto de controle de
velocidade de um gerador de indução operando em paralelo
com um gerador síncrono para se evitar aumento de
frequência do sistema no caso de suprimento de cargas
reduzidas**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Itajubá, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestra em
Ciências em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Itajubá

Orientador: Ângelo José Junqueira Rezek

Itajubá

2021

Lana Gabriella Souza Lopes

**Proposta de um sistema discreto de controle de
velocidade de um gerador de indução operando em
paralelo com um gerador síncrono para se evitar aumento
de frequência do sistema no caso de suprimento de cargas
reduzidas**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Itajubá, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestra em
Ciências em Engenharia Elétrica.

Conceito: _____

Itajubá, 20 de julho de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Professor Doutor Ângelo José Junqueira Rezek – Orientador
UNIFEI

Doutora Adriana Aparecida dos Santos Izidoro
UNA

Doutor José Carlos Grilo Rodrigues
UNIFEI

Aos meu pais, ao meu irmão e ao meu noivo.

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi possível graças à colaboração de várias pessoas, que de alguma maneira, atuaram no processo dos estudos, no apoio incondicional e força. Desta maneira, agradeço:

Primeiramente a Deus, pois sem Ele, nada seria possível.

Agradeço grandemente ao meu orientador, Professor Ângelo José Junqueira Rezek, que me proporcionou meios para poder continuar com este sonho. Sua esposa Milene, que juntamente com ele, me incentivaram para que eu não desistisse. Ensinarão-me, que com força e garra, tudo podemos Naquele que nos fortalece.

Aos colegas de estudo do QMAP (Qualidade de Energia e Proteção Elétrica), que dividiram seus conhecimentos e experiências ao longo desta jornada.

Ao Christel Enock Ghislain Ogoulola, juntamente com o Professor Rezek, que deu todo o suporte para a produção científica.

À minha família, minha mãe Sílvia, meu pai Wellington e meu pai Nivaldo, por todo suporte prestado no tempo longe de casa. Que abraçaram comigo e caminharam juntos, do início até o momento.

Ao meu irmão Pedro Augusto, que é um dos grandes motivos que me faz acordar todos os dias disposta a ser grande e ser exemplo.

Ao meu noivo, Victor Dornellas de França, que teve paciência, e manteve meu entusiasmo, acompanhando meus passos e comemorando comigo cada progresso.

Aos colegas de Itajubá, que enquanto residia na cidade, foram como uma família e serviram de todo o apoio. Em especial, à Fabiana Policarpo de Oliveira, que esteve comigo em momentos cruciais desta caminhada.

Aos colegas de Uberlândia, que mesmo enquanto longe, estiveram acompanhando cada passo da realização deste sonho.

À todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a realização desta dissertação.

*“Foi o tempo que dedicastes à tua
rosa que a fez tão importante.”
Antoine de Saint-Exupéry*

Resumo

No caso da operação em paralelo de gerador síncrono com gerador assíncrono de indução, o gerador síncrono pode ser motorizado, quando o fornecimento da potência ativa pelo gerador de indução for maior que a potência absorvida pela carga alimentada pelos dois geradores em paralelo. Neste caso, tem-se como alternativa para se evitar esta ocorrência, a diminuição da velocidade do gerador assíncrono, para o propósito da diminuição de sua potência ativa de fornecimento. Esta dissertação descreve uma proposta de um sistema de controle de velocidade discreto para a máquina de indução que contempla esta solução. Uma placa eletrônica de aquisição de dados e um microcomputador são usados para possibilitar a implementação do referido sistema de controle de velocidade proposto, no qual não ocorre geração de harmônicos, porque não há conversores estáticos usando semicondutores conectados aos terminais das máquinas, um aspecto favorável com relação à qualidade de energia elétrica.

Palavras-chave: Operação em paralelo, gerador síncrono, gerador de indução, controle de frequência, qualidade de energia elétrica.

Abstract

In the case of parallel operation of a synchronous generator with an asynchronous induction generator, the synchronous generator can be motorized, when the active power supplied by the induction generator is greater than the power absorbed by the load fed by the two generators in parallel. In this case, there is an alternative in order to avoid this occurrence, which is the decrease of the speed of the asynchronous generator, for the purpose of decreasing its active power supplying. This dissertation describes a proposal of a discrete speed control system for the induction machine that contemplates this solution. A data acquisition electronic board and a microcomputer are used to enable the implementation of the referred proposed speed control system, in which harmonics are not generated, because there are no static converters using semiconductors connected at the terminals of the machines, a favorable aspect related to the quality of the electrical energy.

Keywords: Parallel operation, synchronous generator, induction generator, frequency control, power quality.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diferenciação entre motor e gerador.....	16
Figura 2 – Curva característica do conjugado x velocidade.....	17
Figura 3 – Máquina síncrona alimentada pela rede.....	18
Figura 4 – Ligação estrela.	19
Figura 5 – Ligação Triângulo.....	19
Figura 6 – Campo Magnético do estator e corrente induzida no rotor em determinado instante.....	21
Figura 7 – Forças sobre os condutores do rotor no primeiro caso.....	22
Figura 8 – Correntes rotóricas em 90° em atraso.....	22
Figura 9 – Forças sobre os condutores do rotor no segundo caso.	23
Figura 10 – Diagrama simplificado dos geradores.....	27
Figura 11 – Distribuição de Potências com Frequência em 60 [Hz].....	30
Figura 12 - Distribuição de Potências com Frequência em 55 [Hz].....	31
Figura 13 – Diagrama de blocos para controle de velocidade da máquina de corrente contínua.	31

Lista de abreviaturas e siglas

FEM	Força Eletromotriz
GS	Gerador Síncrono
GI	Gerador de Indução
CA	Corrente Alternada

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo	14
2	ESTADO DA ARTE	15
2.1	Princípio de Funcionamento da Máquina Síncrona	16
2.1.1	Funcionamento da Máquina Síncrona como Motor.....	18
2.1.2	Funcionamento da Máquina Síncrona como Gerador.....	19
2.2	Princípio de Funcionamento da Máquina Assíncrona (Indução)	20
2.3	Topologias de Utilização das Máquinas	23
3	CONTROLE DE VELOCIDADE DO GERADOR DE INDUÇÃO	25
4	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS.....	34
	APÊNDICE A – A DETAILED DESIGN PROCEDURE FOR A DISCRETE SPEED CONTROL SYSTEM OF AN ASYNCHRONOUS GENERATOR OPERATING IN PARALLEL WITH A SYNCHRONOUS MACHINE.	37

1 Introdução

No mundo atual, repleto de tecnologias e constantes inovações, fica até difícil imaginar a vida sem a eletricidade. Estudar e compreender a evolução da eletricidade ao longo dos tempos é essencial para projetar futuros cenários e se preparar para eles.

A evolução das máquinas elétricas passou por longo e demorado período, pois eram necessárias aplicações de muitas leis que envolviam eletricidade e magnetismo que, na fase inicial, eram poucos os conhecimentos sobre essa área da física. Então, os experimentos foram acontecendo de forma gradativa. Um dos momentos de maior utilização das máquinas elétricas foi durante a segunda revolução industrial, após a década de 1880, pois, juntamente com a ampla utilização da energia elétrica, as máquinas permitiram o desenvolvimento de um grande número de utilidades domésticas, que seriam os bens de consumo duráveis que, juntamente com o automóvel, constituem grandes símbolos da sociedade atual [1].

As máquinas elétricas estão presentes em todos os lugares. Nas casas, os motores elétricos acionam muitos eletrodomésticos, alguns exemplos são os aspiradores de ar, processadores de alimentos, refrigeradores, aparelhos de ar. Nas indústrias, a força motriz para mover praticamente todas as máquinas é produzida através dos motores. Certamente, para fornecer a energia utilizada por todos esses motores, há necessidade de geradores.

O gerador elétrico basicamente faz o contrário de um motor, convertendo energia mecânica em energia elétrica e, esta energia mecânica, pode ser de uma turbina, por exemplo, e é a base da geração de energia elétrica que chega às residências.

No caso da operação em paralelo de gerador síncrono com gerador assíncrono de indução, o gerador síncrono pode ser motorizado, quando o fornecimento da potência ativa pelo gerador de indução for maior que a potência absorvida pela carga alimentada pelos dois geradores em paralelo.

Neste caso, tem-se como alternativa para se evitar esta ocorrência, a diminuição da velocidade do gerador assíncrono, para o propósito da diminuição de sua potência ativa de fornecimento.

1.1 Objetivo

O objetivo consiste em propor um sistema de controle de velocidade discreto para a máquina de indução, uma vez que, a intenção é a diminuição da potência ativa de fornecimento da mesma.

Serão analisados e estudados métodos de controle para possibilitar a implementação do sistema de controle de velocidade, com o propósito da não geração de harmônicos, um aspecto favorável com relação à qualidade de energia elétrica.

2 Estado da Arte

Geradores são dispositivos capazes de produzir energia elétrica a partir da transformação de outra forma energética. A energia produzida pelos geradores é chamada de força eletromotriz.

A força eletromotriz (FEM) corresponde a todo o potencial elétrico que pode ser produzido por um gerador. Ao ser ligado em um circuito, parte da energia gerada é dissipada em forma de calor em decorrência da formação de uma corrente elétrica em seu interior. Esse fenômeno, chamado de efeito Joule, ocorre porque os geradores apresentam certa resistência interna, logo, não há gerador perfeito [2].

De acordo com esta lei do eletromagnetismo em toda espira submetida a uma variação de fluxo é induzida uma tensão; matematicamente:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Sendo:

e - Tensão induzida na espira [V]

ϕ - Fluxo magnético na espira [weber]

No caso de uma bobina com N espiras têm-se:

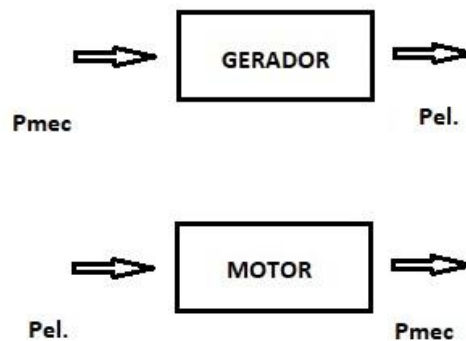
$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Esta descoberta permitiu a construção de equipamentos elétricos importantes os mais diversos, tais como: máquinas elétricas, instrumentos de medição, instrumentos de proteção, etc.

2.1 Princípio de Funcionamento da Máquina Síncrona

Uma máquina elétrica pode funcionar tanto como motor ou gerador. A diferença se traduz, portanto, quanto ao fluxo de potências conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Diferenciação entre motor e gerador.



Fonte: produzido pelo autor.

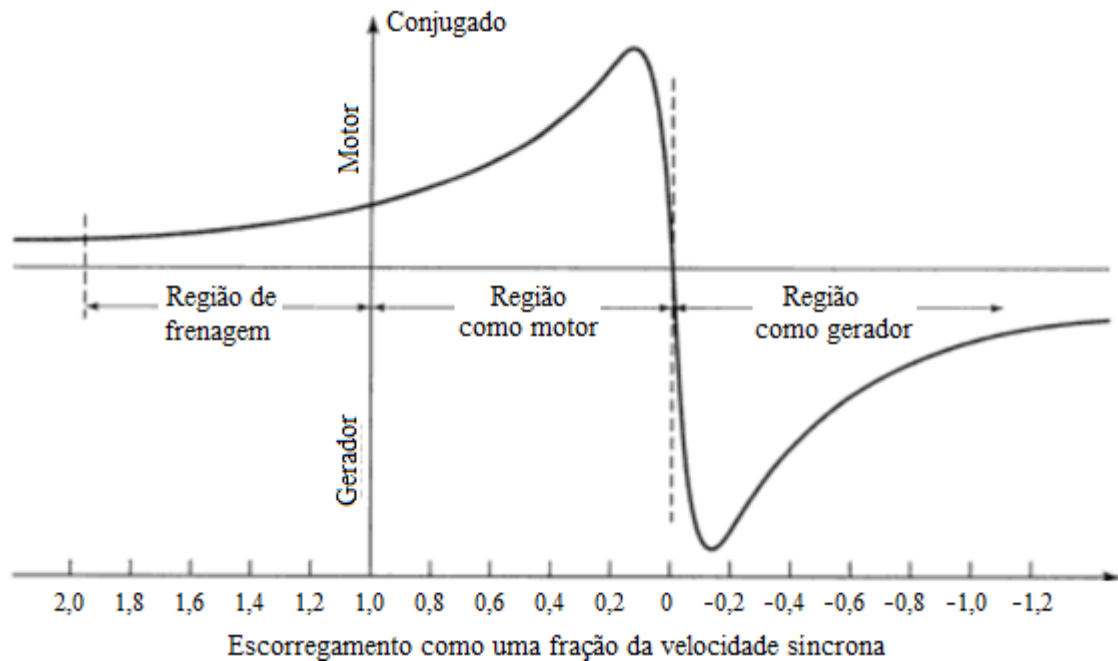
O gerador recebe potência mecânica de uma máquina primária em seu eixo e devolve potência elétrica em seus terminais. O motor recebe potência elétrica em seus terminais e desenvolve potência mecânica em seu eixo para a realização de trabalho.

As máquinas elétricas, que podem funcionar como geradores, são os três tipos tradicionais existentes:

- Máquina de indução assíncrona.
- Máquina síncrona.
- Máquina de corrente contínua.

A relação motor/gerador em uma máquina de indução tipo gaiola de esquilo, é dada pelos parâmetros da curva típica característica de conjugado x velocidade. Onde a faixa de operação na condição motora ou na condição geração é apenas uma parte da curva característica representada na Figura 2 [3].

Figura 2 – Curva característica do conjugado x velocidade.



Fonte: FITZGERALD, A.E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS, S.D. “Máquinas Elétricas”.
Bookman; Edição: 6. 2006.

Na condição de funcionamento como motor, o rotor está girando no sentido de rotação do campo magnético produzidas pelas correntes do estator, neste momento a velocidade estará entre 0 e a velocidade síncrona da máquina corresponde a um escorregamento entre 1 e 0 na região indicada como motor.

E, na condição de funcionamento como gerador, o rotor deve ser acionado mecanicamente por uma fonte primária acima da velocidade síncrona, como fonte primária uma turbina hidráulica ou eólica, o que ocasiona um escorregamento negativo.

Devido a razões construtivas e ao seu custo maior em relação às máquinas de indução, as máquinas síncronas são, entretanto, mais utilizadas como geradores. Como motores elas são em geral utilizadas em altas potências (acima de 600 CV), onde apresentam vantagens importantes em relação aos motores de indução. Por outro lado, máquinas síncronas a imãs permanentes vêm tendo uma utilização cada vez maior em baixas e médias potências especialmente quando se necessitam de velocidade variável, alto rendimento e respostas dinâmicas rápidas. Tanto as máquinas síncronas tradicionais de rotor bobinado como as máquinas síncronas a imãs permanentes necessitam em geral de um conversor para o seu acionamento e controle, caso seja necessários que elas operem como motor com velocidade variável [4].

2.1.1 Funcionamento da Máquina Síncrona como Motor

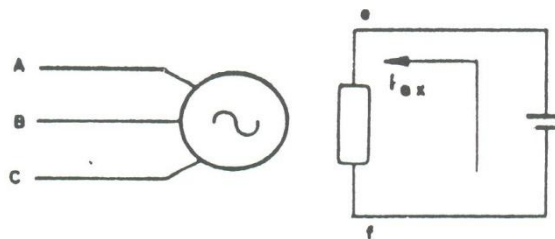
A máquina síncrona como motor é bastante utilizada tendo como propriedade ainda à possibilidade de correção do fator de potência com a utilização do mesmo. Nas centrais algumas máquinas síncronas podem também funcionar motorizadas. Com isto, a máquina fica disponível no sistema podendo a qualquer momento passar novamente para gerador.

As máquinas são motorizadas para atender principalmente a duas finalidades:

1. Economizar água do reservatório;
2. Regular o fluxo de reativo do sistema.

Como motor a máquina síncrona é alimentada pela rede (Figura 3).

Figura 3 – Máquina síncrona alimentada pela rede.



Fonte: produzido pelo autor.

As bobinas do estator alimentadas pela rede são responsáveis pela criação do campo girante, por intermédio de um sistema trifásico. O rotor excitado com corrente contínua se transforma numa “agulha magnética” imantada e tende a acompanhar o campo girante do estator. O motor gira, portanto, a mesma velocidade do campo girante do estator, resultando daí a designação de motor síncrono.

O motor síncrono, no momento da partida, precisa ser levado à velocidade próxima à síncrona por algum dispositivo auxiliar, para que então com a ligação do circuito de excitação, o mesmo pule para o sincronismo. Os principais métodos de partida para os motores síncrono são:

- a) Utilização de um motor de corrente contínua acoplado ao eixo do motor síncrono.

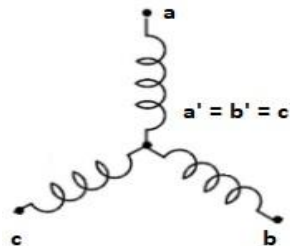
- b) Utilização de um pequeno motor de indução
- c) Partida do motor como se fosse motor de indução, gaiola de esquilo, por intermédio dos enrolamentos amortecedores.

Dentre os métodos apresentados o mais comum é o ultimo, pois este método é o mais simples e não requer máquinas auxiliares especiais.

2.1.2 Funcionamento da Máquina Síncrona como Gerador

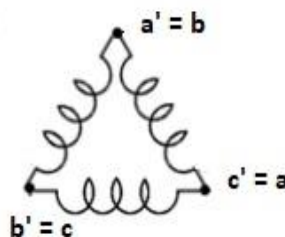
O rotor excitado com corrente contínua e colocado a girar por intermédio da máquina primária, produz um campo magnético girante. Este campo girante intercepta as espiras do estator, produzindo nas mesmas um fluxo variável. Desta maneira, de acordo com a lei de Faraday, em uma bobina submetida a uma variação de fluxo, é induzida uma tensão. Logo, aparece nos terminais do gerador uma tensão induzida denominada força eletromotriz induzida. As bobinas do estator podem estar conectadas em estrela ou triângulo. As Figuras, 4 e 5, ilustram.

Figura 4 – Ligação estrela.



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 5 – Ligação Triângulo.



Fonte: produzido pelo autor.

Geralmente a conexão preferida para as bobinas do estator é a conexão estrela, principalmente por problemas de isolamento, pois desta maneira as bobinas ficam submetidas a uma tensão menor.

Conforme ilustrado na Figura 1, o gerador recebe potência mecânica no eixo de outra máquina, denominada máquina primária. As máquinas primárias podem ser, por exemplo:

- Turbinas hidráulicas;
- Turbinas a vapor ou a gás;
- Motor diesel.

As mais utilizadas são as turbinas hidráulicas uma vez que as turbinas a vapor exigem a queima de derivados de petróleo para a obtenção do vapor. O motor diesel é utilizado principalmente nos grupos geradores diesel de emergência. Podemos encontrar estes grupos em hospitais e também em usinas hidrelétricas como suprimento de emergência para os serviços auxiliares das mesmas e em locais remoto desprovidos de turbinas.

2.2 Princípio de Funcionamento da Máquina Assíncrona (Indução)

Os motores de indução trifásicos, devido à simplicidade, robustez e custo relativamente baixo são utilizados largamente no setor industrial. Pode-se mesmo afirmar que a maioria dos motores existentes nas indústrias pertence a este tipo.

Em [23] vê-se que a grande desvantagem do motor de indução trifásico consiste na dificuldade de controle de velocidade deste tipo de motor. Entretanto, com o desenvolvimento da eletrônica de potência, modernos sistemas de controle eletrônicos vêm sendo implementados de tal maneira a possibilitar um melhor controle de velocidade para o mesmo. O custo de implementação destes sistemas vem ficando cada vez mais acessíveis.

O motor de indução é constituído basicamente do estator e o rotor. Ambas as partes são feitas de aço silício laminado. No estator estão alojadas as bobinas para a produção do campo girante.

O rotor pode ser de dois tipos:

- Rotor em gaiola de esquilo;

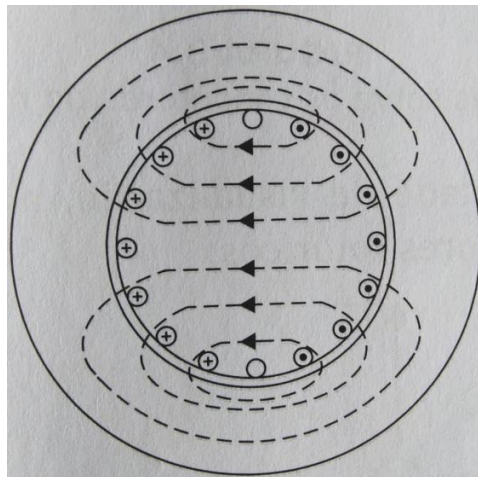
- Rotor bobinado.

As bobinas do estator produzem um campo magnético rotativo que corta as espiras do rotor induzindo nas mesmas forças eletromotrizes (Lei de Faraday).

Surgirão então correntes induzidas no rotor, daí o nome motor de indução. A interação entre o campo magnético girante resultante e a corrente induzida no rotor resulta em torque e o motor gira.

A Figura 6 ilustra o campo magnético resultante cortando os condutores do rotor e a corrente induzida no rotor em determinado instante.

Figura 6 – Campo Magnético do estator e corrente induzida no rotor em determinado instante.



Fonte: produzido pelo autor.

No instante considerado o campo girante encontra-se na horizontal no sentido da direita para a esquerda.

De acordo com a lei do eletromagnetismo acerca das forças \vec{F} sobre condutores de corrente imersos em campo magnético, aparecerão forças indicadas na Figura 7 sobre os condutores do rotor. A lei é a seguinte:

$$\vec{F} = I (\vec{\ell} \times \vec{B}) \quad (3)$$

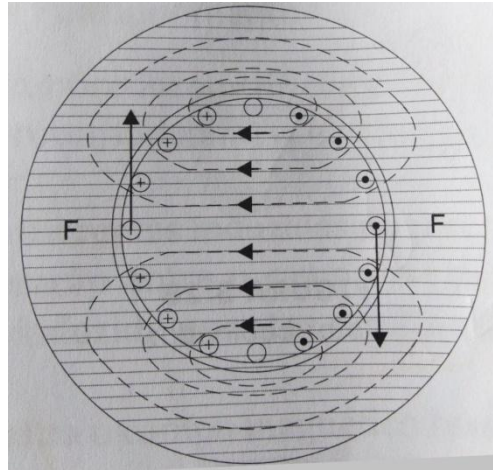
Sendo:

I = corrente

$\vec{\ell}$ = vetor comprimento

\vec{B} = vetor indução magnética

Figura 7 – Forças sobre os condutores do rotor no primeiro caso.

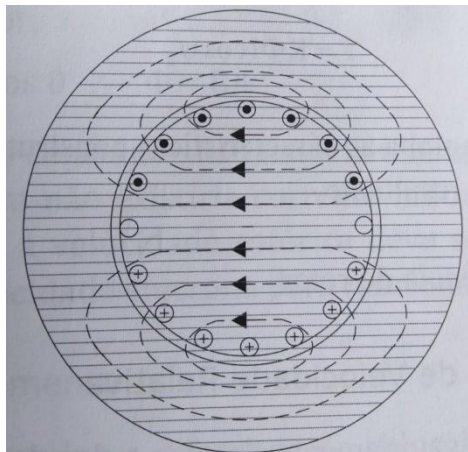


Fonte: produzido pelo autor.

Considere agora a situação em que a corrente rotórica está a 90° elétricos em atraso com relação ao caso anterior.

A Figura 8 mostra as correntes rotóricas em atraso de noventa graus.

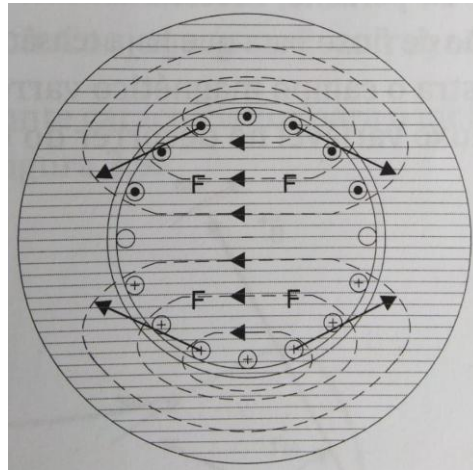
Figura 8 – Correntes rotóricas em 90° em atraso.



Fonte: produzido pelo autor.

Neste caso as forças sobre os condutores aparecem na Figura 9.

Figura 9 – Forças sobre os condutores do rotor no segundo caso.



Fonte: produzido pelo autor.

Neste caso as forças se anulam e o motor não gira. Pode-se concluir, então, que o conjugado depende do fator de potência do rotor.

No primeiro caso para fator de potência unitário o conjugado é máximo. Para fator de potência zero (2º caso) o conjugado é nulo. Convém lembrar que no 2º caso a corrente se encontra defasada de 90º com relação ao 1º caso.

2.3 Topologias de Utilização das Máquinas

A investigação das topologias das máquinas é de extrema importância, buscam entender o estado da arte, bem como obter embasamento para o decorrer desta dissertação.

De acordo com o artigo [5], a crise energética brasileira em 2001 foi agravada pela prolongada estiagem no país e teve como solução inicial a utilização de geração termelétrica oriunda de GSs acionados por um motor primário de combustão a óleo diesel. Esse esquema pode ser utilizado em sistemas de emergência e em operação isolada em horários de ponta nas indústrias e em estabelecimentos comerciais. O GS é facilmente colocado em operação paralela com um sistema elétrico de potência, mas devido ao seu alto custo de fabricação e manutenção, o uso de GI vem sendo estudado, e estão sendo realizadas análises de seu comportamento em diversos cenários [6].

A máquina de indução é muito utilizada na indústria como motor de indução (bombas, ventiladores, compressores, elevadores, outros), embora, construtivamente, possa ser usada como motor ou gerador. Nos últimos anos, a máquina de indução começou a ser mais utilizada como gerador de energia, sendo aplicada em sistemas de geração eólica, em pequenas hidroelétricas e locais remotos ou rurais, devido a seu menor custo de manutenção, simplicidade e robustez.

Devido às vantagens do GI com rotor gaiola de esquilo, seu uso tem se tornado cada vez mais comum. Além disso, a crescente preocupação com o meio ambiente fez com que se aumentasse muito o número de fontes renováveis de energia, sendo o GI empregado, por exemplo, em geração eólica e em pequenas centrais hidrelétricas.

É comum encontrar materiais de pesquisa que descrevem a operação em paralelo do gerador síncrono e do gerador de indução. Nesse tipo de operação, alguns parâmetros podem ser analisados, tais como: potência reativa e ativa do sistema, fator de potência, corrente, tensão e frequência.

Em [7], o controle de frequência e tensão durante a operação em paralelo foi avaliado, considerando o gerador de indução fornecendo potência constante e sem controle de excitação, considerando que o gerador síncrono possui excitação variável para diferentes condições de carga. Os resultados também mostram que a mudança no consumo de carga reativa pode ser fornecida pelo gerador síncrono, mantendo a tensão constante em 1 pu. O GI opera em plena capacidade e não responde à mudança de carga no consumidor.

Assim, uma vantagem da utilização de geradores de indução autoexcitados operando juntamente com geradores síncronos é o fato de que o gerador síncrono pode fornecer a parcela complementar de potência ativa que a carga consome.

3 Controle de Velocidade do Gerador de Indução

Os geradores de indução não conseguem realizar controle de tensão ou de velocidade (frequência) do sistema onde se encontram conectados [6]. A variação de carga no sistema faz com que a tensão em seus terminais não seja constante, portanto, para manter a tensão em valores estáveis, são necessárias aplicações de técnicas de controle.

No Capítulo 2, são abordados os princípios de funcionamento das máquinas síncrona e assíncronas. Como já visto, para um motor de indução operar como gerador é preciso garantir que a frequência de escorregamento seja negativa por meio do processo de interação entre o fluxo residual da máquina de indução e o banco de capacitores conectados aos terminais, desse modo pode se obter a autoindução provocando um crescimento da tensão de terminal [8].

Através dessa análise, vê-se a necessidade do aprofundamento da pesquisa sobre o controle de tensão e frequência, pois, para que possa haver excitação no gerador de indução, um banco de capacitores fornece potência reativa a fim de manter os parâmetros nominais para a tensão e frequência aceitáveis do gerador para as cargas. Em desequilíbrio das cargas que possa ocorrer, deve haver algum sistema para controle de tensão conforme a demanda de carga, pois a tensão pode variar sua amplitude operando em situações de sobre tensão ou sub tensão, o que é prejudicial para as cargas. Já o controle da frequência pode ser realizado variando-se a velocidade angular no eixo do gerador de indução. Se o gerador de indução operar juntamente com o gerador síncrono, o controle de frequência pode ser realizado pelo regulador de velocidade da máquina síncrona.

Os níveis de tensão e frequência dentro dos limites estabelecidos garante a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

3.1 Aumento da Frequência em Decorrência do Paralelismo

O aumento de frequência no sistema constituído por geradores em paralelo, gerador síncrono e gerador de indução, ocorre quando há uma carga principal baixa, menor que a potência ativa gerada pelo gerador de indução, devendo-se então, como solução para evitar esta ocorrência, diminuir a potência fornecida por esta máquina.

Na tese de doutorado [10], este procedimento foi feito de maneira de controle manual de velocidade do gerador de indução, que estava acoplado eixo a eixo com uma máquina primária, motor de corrente contínua.

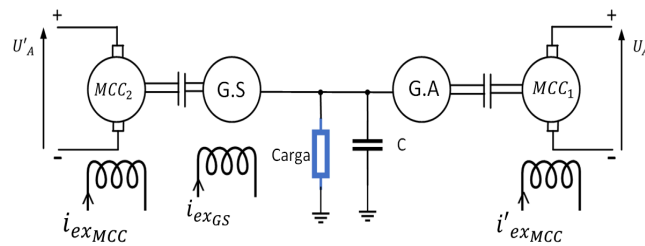
Outra opção utilizada, foi o da inserção de uma carga auxiliar resistiva, tipo lastro [11], controlando-se a potência desta carga, para controle de frequência, set point de frequência, ligeiramente superior àquela relacionada com a velocidade de referência do motor de corrente contínua. Desta maneira, o controle de frequência é seletivo, ou seja, para o caso de controle de frequência pela carga auxiliar, está inoperante o controle de velocidade do motor de corrente contínua, máquina primária para a máquina síncrona e quando opera o controle de velocidade do gerador síncrono, está inoperante o controle de frequência pela carga lastro, condição esta de operação normal do sistema.

Sendo assim, no caso da motorização da máquina síncrona para carga principal reduzida, quando a potência ativa fornecida pelo gerador de indução é superior à potência ativa da carga principal, opera o controle de frequência do sistema empregando carga auxiliar lastro. Mas, para que não ocorra a motorização da máquina síncrona e aumento da frequência do sistema, pode-se ter como solução alternativa, o controle de velocidade do gerador de indução, não havendo necessidade da utilização de um sistema de controle por intermédio da carga auxiliar lastro.

3.2 Circuito de Controle de Velocidade de um Gerador de Indução

Muitas referências apontam diversos tipos de realizar o controle de velocidade, neste, será proposto uma solução digital baseada em um sistema composto por um microcomputador uma placa de aquisição de dados. Na Figura X, vê-se o esquemático do sistema proposto.

Figura 10 – Diagrama simplificado dos geradores.



Fonte: produzido pelo autor.

Uma tensão U_t , que é aquela do transdutor de potência ativa [12], [13], queda de tensão no resistor do transdutor de potência ativa da carga, será utilizada como tensão do transdutor de potência ativa da carga, para entrada analógica da placa, por exemplo, a PCL 711 B [14] (conversor A/D da placa). Esta placa é prevista como possibilidade para ser utilizada, para propiciar a implementação do sistema discreto de controle de velocidade proposto para o gerador de indução. O software em linguagem C ++ vai utilizar esta entrada para fornecer as referências de velocidade para o gerador de indução. Para potência nominal carga, tem-se, por exemplo, uma tensão no transdutor de 5,0 [V].

Esta tensão do transdutor será a entrada analógica, conversor A/D da placa PCL 711 B, a ser inserida em slot livre de um microcomputador previsto na utilização para o controle discreto de velocidade da máquina de indução. A saída analógica da placa, conversor D/A será o sinal de entrada para a referência de velocidade do circuito de controle de velocidade da máquina de corrente contínua que aciona o gerador de indução.

A tensão U_t é a tensão do transdutor da potência ativa da carga, entrada analógica, conversor A/D da placa, sendo, por exemplo, de 5,0 [V], quando a potência ativa da carga dos geradores em paralelo é igual a 100% da potência ativa nominal desta carga, 4,0 [V], quando esta carga em paralelo é de 80% da potência ativa nominal, 3,0 [V], quando é de 60% da potência ativa nominal, de 2,0 [V] quando é de 40% da potência ativa nominal e de 1,0 [V], quando é igual a 20% da potência ativa nominal da carga dos geradores em paralelo.

São fornecidas cinco velocidades de referências para controle de velocidade do motor de corrente contínua do grupo do gerador de indução, conforme malha de controle de velocidade descrita em [10], [15], [16].

Tem-se: $n_{ref5} < n_{ref4} < n_{ref3} < n_{ref2} < n_{ref1}$.

Logo vai-se diminuindo gradativamente a velocidade do gerador de indução, velocidades sempre maiores que a velocidade síncrona. A máquina síncrona (mestre) possui regulador de velocidade para controle de frequência e regulador de tensão para controle da tensão do sistema elétrico formado pela associação em paralelo gerador síncrono (mestre) – gerador de indução (escravo), conforme [10], [11], [17], [18], [19], [20], [21]. Nestas implementações o gerador de indução (escravo) fornece uma potência ativa em função da velocidade mecânica de eixo e o gerador síncrono (mestre) complementa a potência ativa requerida pela carga.

Com a diminuição gradativa da velocidade do gerador de indução, diminui-se também a potência fornecida pelo mesmo, em função da diminuição da potência ativa da carga. Para velocidade de referência, n_{ref5} , tem-se a máquina de indução flutuando, ou seja, sua velocidade é igual à velocidade síncrona. Ressalta-se que para o funcionamento da máquina assíncrona como gerador, sua velocidade deve ser maior que a velocidade síncrona, conforme apresentado na Figura 2. Quando esta velocidade é menor, a máquina funciona como motor. Considerando conforme [10], a potência ativa nominal da carga ($P_{nominal}$) é obtida (4). A corrente nominal de carga trifásica (I_{carga}) foi considerada igual a 5 [A] e a tensão nominal de carga (V_{ff}) igual a 220 [V]. Portanto resulta:

$$P_{nominal} = \sqrt{3} \times V_{ff} \times I_{carga} = \sqrt{3} \times 220 \times 5 = 1905 \text{ [W]} \quad (4)$$

De acordo com [12], a corrente de saída do transdutor de potência ativa, para esta condição de potência nominal é igual a 20 [mA] e para a queda de tensão através do resistor R (resistor do transdutor de potência ativa), igual a 5.0 [V], resulta:

$$R = 0.250 \text{ [k } \Omega \text{]} \text{ ou } 250 \text{ [}\Omega \text{]}$$

3.2.1 Faixa de Velocidade de Referência

O programa previsto para utilização em linguagem C++ utiliza a entrada analógica da placa eletrônica PCL 711 B, tensão do transdutor de potência ativa da carga, U_t e com a finalidade de fornecer a tensão de saída da placa, n_{ref} , conversor D/A, realiza as comparações descritas a seguir.

$$\text{If } U_t < 1,0 \text{ } n_{ref} = V_5$$

If $U_t \geq 1,0$ $n_{ref} = V4$

If $U_t \geq 2,0$ $n_{ref} = V3$

If $U_t \geq 3,0$ $n_{ref} = V2$

If $U_t \geq 4,0$ $n_{ref} = V1$

As tensões V1, V2, V3, V4 e V5 são as respectivas tensões para as referências de velocidades da máquina de corrente contínua (n_{ref}) que aciona o gerador de indução, conforme malha de controle de velocidade mostrada na Figura 13.

3.2.2 Faixa de Histerese de Controle

Deve-se considerar, por exemplo, uma faixa de histerese de 0,1 [V], para se evitar operação intermitente, quando no caso da tensão do transdutor de potência ativa da carga ficar variando em torno das tensões de transições para n_{ref} . Assim as lógicas de comparações passam a ser, conforme a seguir, para contemplar a inserção da referida histerese no sistema de controle discreto proposto.

If $U_t \leq 0,95$ $n_{ref} = V5$

If $U_t \geq 1,05$ $n_{ref} = V4$

If $0,95 < U_t < 1,05$ $n_{ref} = n_{ref}$

If $U_t \geq 2,05$ $n_{ref} = V3$

If $1,95 < U_t < 2,05$ $n_{ref} = n_{ref}$

If $U_t \geq 3,05$ $n_{ref} = V2$

If $2,95 < U_t < 3,05$ $n_{ref} = n_{ref}$

If $U_t \geq 4,05$ $n_{ref} = V1$

If $3,95 < U_t < 4,05$ $n_{ref} = n_{ref}$

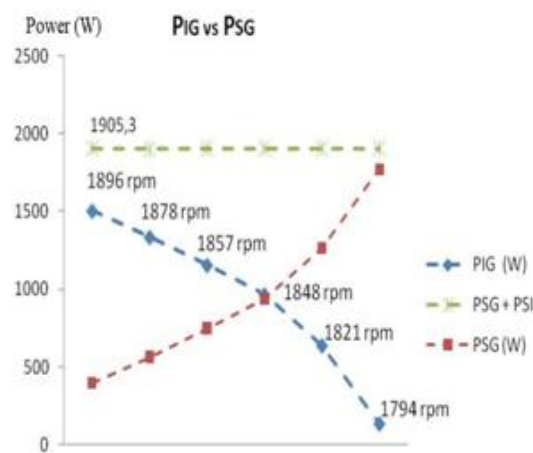
Logo, as tensões de saída da placa, conversor D/A são estas tensões mencionadas V1, V2, V3, V4 e V5, de acordo com a lógica do programa em C++, que se baseia nas comparações mencionadas, para fornecimento desta tensão de saída da placa, conversor D/A.

A Figura 11 [10] mostra a distribuição de potência ativa entre os geradores para operação em 60 [Hz], cuja velocidade síncrona corresponde a 1800 [rpm]. Na velocidade de 1848 [rpm], verifica-se a contribuição igual da potência ativa de cada gerador.

Assim, resulta para as velocidades da máquina assíncrona: $n_{ref1} = 1848$ [rpm]; $n_{ref2} = 1836$ [rpm]; $n_{ref3} = 1824$ [rpm]; $n_{ref4} = 1812$ [rpm] e $n_{ref5} = 1800$ [rpm], considerando o degrau equidistante de velocidade igual a 12 [rpm], correspondendo a $V1 = 10$ [V], $V2 = 9,94$ [V], $V3 = 9,87$ [V], $V4 = 9,80$ [V] e $V5 = 9,74$ [V].

A potência ativa da carga é a soma das contribuições de potência ativa das duas máquinas operando em paralelo. Constata-se que a potência ativa fornecida pelo gerador de indução é função da velocidade de eixo desta máquina, sendo diretamente proporcional, ou seja, quando se aumenta o escorregamento negativo a contribuição de potência ativa do mesmo também aumenta. O gerador síncrono complementa, portanto, o fornecimento da potência ativa requerida pela carga.

Figura 11 – Distribuição de Potências com Frequência em 60 [Hz].

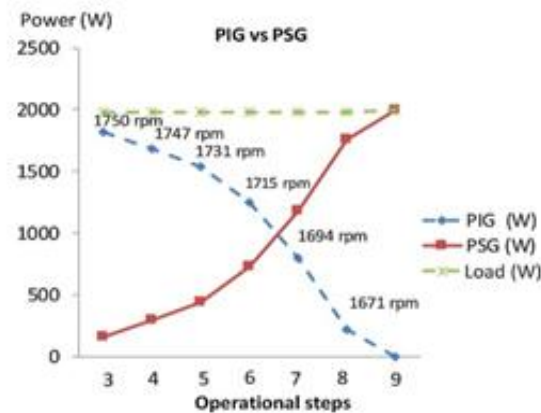


Fonte: [10].

A Figura 12 [10] mostra a distribuição de potência ativa entre os geradores para operação em 55 [Hz], cuja velocidade síncrona corresponde a 1650 [rpm]. A potência ativa da carga verificada nesta figura é apenas ligeiramente maior que a potência ativa nominal da carga, portanto, para fins de determinação da velocidade n_{ref1} , os resultados experimentais mostrados nesta figura podem ser considerados. Na velocidade de 1702 [rpm], verifica-se a contribuição igual da potência ativa de cada gerador. Assim, resulta para as velocidades da máquina assíncrona: $n_{ref1} = 1702$ [rpm]; $n_{ref2} = 1689$ [rpm]; $n_{ref3} = 1676$ [rpm]; $n_{ref4} = 1663$ [rpm] e n_{ref5}

= 1650 [rpm], considerando o degrau equidistante de velocidade igual a 13 [rpm], correspondendo a $V1 = 9,21$ [V], $V2 = 9,14$ [V], $V3 = 9,07$ [V], $V4 = 9,00$ [V] e $V5 = 8,93$ [V].

Figura 12 - Distribuição de Potências com Frequência em 55 [Hz].

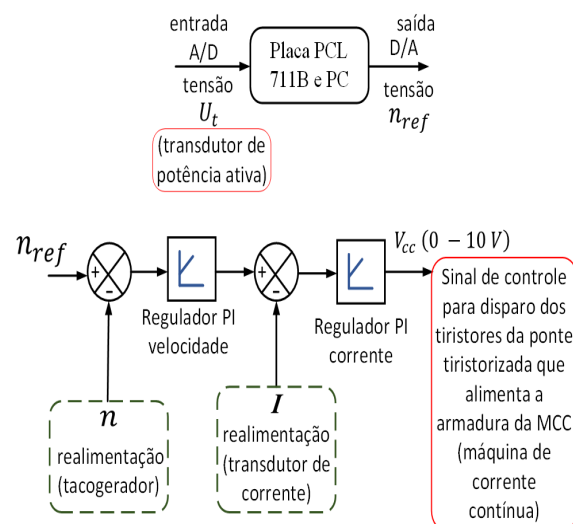


Fonte: [10].

Estas tensões são os sinais de entrada n_{ref} da malha de controle de velocidade discreto do motor de corrente contínua, máquina primária do gerador de indução, conforme mostrado na Figura 13, sendo que para a máquina síncrona, $n_{ref} = V5$ (velocidade síncrona).

A Figura 13 mostra o diagrama de blocos utilizando reguladores, para controle de velocidade das máquinas de corrente contínua acopladas aos geradores síncrono e assíncrono [10], [15], [16]. Estas máquinas de corrente contínua atuam como máquinas primárias para ambos os geradores.

Figura 13 – Diagrama de blocos para controle de velocidade da máquina de corrente contínua.



Fonte: produzido pelo autor.

A operação em paralelo de gerador síncrono e gerador assíncrono é interessante para aplicação em sistemas de micro centrais, [22].

4 Conclusão

Neste trabalho procedeu-se à descrição de um método alternativo de projeto de um sistema de controle discreto de velocidade do gerador de indução, diminuindo-se sua potência ativa fornecida, quando há diminuição da potência ativa da carga suprida pelo sistema formado pelos dois geradores em paralelo.

Assim evita-se que haja um superávit de potência ativa de geração, comparativamente à potência ativa da carga alimentada, quando ocorre, neste caso, aumento da frequência do sistema e motorização da máquina síncrona.

A grande vantagem deste método alternativo é que, em relação à injeção harmônica de corrente feita pela carga, pode ser desconsiderada, uma vez que o estudo baseia-se em teoria (com a prática poderia encontrar efeitos mais significativos) comparativamente ao caso em que a carga resistiva lastro auxiliar foi considerada e implementada em [10] e [11]. Neste caso da utilização da carga auxiliar, foi empregada uma carga tipo lastro trifásica resistiva controlada CA (corrente alternada), empregando tiristores em ante paralelo por fase. O aspecto mencionado de não ocorrência de geração de harmônicos é favorável com relação à melhoria da qualidade da energia elétrica.

O sistema de controle discreto de velocidade proposto para o gerador de indução também possibilita uma distribuição de carga equitativa para os geradores operando em paralelo. Este fato consiste também em outra vantagem do procedimento de projeto apresentado. Portanto, a proposta do projeto original descrito utilizando microcomputador e placa de aquisição de dados consiste na principal contribuição do artigo.

Infelizmente, devido ao cenário atual (Pandemia COVID-19), o trabalho necessitou de modificações para que o tornasse possível. A impossibilidade de desenvolver os estudos em ambiente laboratorial não interferiu no desenvolvimento do tema.

Sugere-se para trabalhos futuros a implementação do sistema de controle de velocidade proposto.

Referências

- [1] E. L. G. Teixeira. "Comportamento de um Gerador de Indução Trifásico Autoexcitado," Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2018, [Online]. Disponível: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023377.pdf>
- [2] HELERBROCK, Rafael. "**Geradores Elétricos e Força Eletromotriz**"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/geradores-eletricos-forca-eletromotriz.htm>. Acesso em 20 de julho de 2020.
- [3] FITZGERALD, A.E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS, S.D. "**Máquinas Elétricas**". Bookman; Edição: 6. 2006.
- [4] FORTUNATO, João Gabriel Benevides. "**Introdução à Máquina Síncrona**". Disponível em: <https://silo.tips/download/introducao-a-maquina-sincrona#>. Acesso em 28 de julho de 2020.
- [5] VANÇO, W. E. et al. "**Experimental Analysis of a Self-Excited Induction Generators Operating in Parallel with Synchronous Generators Applied to Isolated Load**", Revista IEEE América Latina, v. 14, p. 1730-1736, 2016.
- [6] GOMES, F. S. C., "**Estudo do Comportamento de uma Usina Elétrica Isolada com Gerador Síncrono e Gerador de Indução**", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1992.
- [7] MAGALHÃES, A. S., MORAES, P. H. F., SILVA, A. H. F., GOMES, P. H., ALVES, A. J, CALIXTO, W. P., "**Reconditioning in synchronous operation with one parallel induction generator**", Transactions on Environment and Electrical Engineering ISSN 2450-5730 Vol 1, No 4, 2016.
- [8] LUCZKIEWICZ, C. A. "**Controle de Tensão e Frequência para um Gerador de Indução Utilizando Lógica Binária**". 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.
- [9] BRAGA, A.V; REZEK, A. J. J; SILVA, V. F; VIANA, A. N. C; BORTONI, E. C; SANCHEZ, W. D. C; RIBEIRO. P. F. "**Isolated induction generator in a rural Brazilian area: Field performance tests**". Renewable Energy 83, pp 1352-1361, 2015.
- [10] V. Z. Silva, "**Dynamic emulation and analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system**," Ph.D. dissertation, Federal University of Itajubá - UNIFEI, Brazil, 2020, [Online]. Available: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2200>

- [11] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and C. E. G. Ogoulola, “**Alternatives to control the frequency increase in an electric system with synchronous and induction generators in parallel operation mode,**” *Electric Power Systems Research*, vol. 180, p. 106136, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106136>
- [12] ETP30 **Active power transducer**, ABB, Hartmann and Braun N 00312/4 Datasheet, 2005. [Online]. Available: https://www.alfatronic.com.br/manuais/1548262113_ETP30_ETQ30.pdf
- [13] F. W. S. Carvalho, “**Variable frequency transformer applied to hydro electric generation with variable speed (in portuguese),**” Master’s thesis, Federal University of Itajuba’ - UNIFEI, Brazil, 2011. [Online]. Available: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1367>
- [14] ADVANTECH Co., Ltda. “**PCL-711B - PC-MultiLab User’s Manual**”; Taiwan: Advantech Co., Ltd., aug., 1993.
- [15] F. FROHR and F. ORTTENBURGUER, **Introduction to electronic control (in spanish)**. Marcombo SA, Siemens Aktiengesellschaft, 1986.
- [16] Â. J. J. REZEK et al. **Modelling and implementation of a series dc motor drive system**, [Online] Available: <https://www.intechopen.com/books/fuzzy-logic-tool-for-getting-accurate-solutions/modelling-and-implementation-of-a-series-dc-motor-drive-system>
- [17] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corrêa, “**Analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system using a ballast load as a regulation system under transient conditions.**” *IJESAR*, 2018, pp. 22–37. [Online]. Available: <http://ijesar.in/index.php/ijesar/article/view/112>
- [18] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corrêa, “**Transients analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system,**” in *COBEP 2017*, pp. 1-6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8257236>
- [19] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corrêa, “**Analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system,**” in *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, 2017, pp. 1-8. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7972459>
- [20] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corrêa, “**Novel topology analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an offshore isolated electric system.**” *The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE*, 2017, pp. 1-10. [Online]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/clagtee/2017/book.html>

- [21] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corrêa, “**Novel Analysis of Synchronous and Induction Generators in Parallel Operation Mode in an Isolated Electric System,**” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*, 2017, pp. 203-216, Vol. 2. [Online]. Available: <https://astesj.com/v02/i06/p25/>
- [22] F. D. Wijaya, L. N. Gajayana, and H. P. Wijaya, “**Parallel operation synchronous and induction generator on microgrid testbed,**” in 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). IEEE, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8250476>
- [23] A.J.J. Rezek, “**Fundamentos básicos de máquinas elétricas: teoria e ensaios,**” Synergia e Acta editoras, 2011.
- [24] L. G. S. Lopes. et al. “**Geradores síncrono e assíncrono em paralelo: controle de velocidade discreto para evitar sobrefrequência do sistema.**” *Eletricidade Moderna*, 2021, [Online]. Disponível: https://www.arandanet.com.br/revista/em/artigos_academicos/25-Geradores-sincrono-e-assincrono-em-paralelo:-controle-de-velocidade-discreto-para-evitar-sobrefrequencia-do-sistema
- [25] L. G. S. Lopes. et al. “**A Detailed Design Procedure for a Discrete Speed Control System of an Asynchronous Generator Operating in Parallel with a Synchronous Machine.**” artigo aprovado para apresentação no CBQEE 2021, [Online].

Apêndice A – A Detailed Design Procedure for a Discrete Speed Control System of an Asynchronous Generator Operating in Parallel with a Synchronous Machine.

Artigo aprovado para apresentação no CBQEE 2021 que apresenta uma solução de controle analógico de controle de velocidade discreto para o gerador de indução. No texto da dissertação foi apresentada a solução de controle digital empregando placa de aquisição de dados dedicada e microcomputador.



A Detailed Design Procedure for a Discrete Speed Control System of an Asynchronous Generator Operating in Parallel with a Synchronous Machine

Lana Gabriella Souza Lopes

Institute of Electrical Systems and Energy
Federal University of Itajubá
Itajubá, Brazil
lanagabriella08@hotmail.com

Angelo José Junqueira Rzesak

Institute of Electrical Systems and Energy
Federal University of Itajubá
Itajubá, Brazil
rzesak@unifai.edu.br

Claudimilson Alves Luczkiewicz

Institute of Electrical Systems and Energy
Federal University of Itajubá
Itajubá, Brazil
claudiocaln@hotmail.com

Christel Enock Ghislain Ogoulola

Institute of Electrical Systems and Energy
Federal University of Itajubá
Itajubá, Brazil
christel@unifai.edu.br

Vinicius Zimmermann Silva

Institute of Electrical Systems and Energy
Federal University of Itajubá
Itajubá, Brazil
vinicius.zimmermann@yahoo.com.br

José Carlos de Oliveira

Electrical Engineering Department
Federal University of Uberlândia
Uberlândia, Brazil
jcoliveira@ufu.br

Thiago Borges André

Institute of Electrical Systems and Energy
Federal University of Itajubá
Itajubá, Brazil
tborges.andre@gmail.com

Abstract— The alternative of a generation system constituted by the parallel operation of synchronous machines with induction ones, can according to the operating conditions imposed by the connection network and primary sources of energy, lead to the phenomenon of motorization of one or another generator. Aiming at eliminating this risk, it takes the form of controlling the speed of the induction generator, aiming at the stability of the set with respect to the control of the flow of active power. In this regard, the present article is focused on the proposition of a conception of a control system that leads, through discreet adjustments of the speed of the asynchronous machine, to a mechanism capable of mitigating the question: now raised. The proposed system, due to its physical nature, does not present itself as a device based on electronic controls of the waveforms, thus avoiding the production and propagation of harmonic currents for the set. This property proves to be advantageous since it does not harm the quality of electricity issues for the generation complex and adjacent electrical system.

Keywords— Operation in parallel, synchronous generator, induction generator, frequency control, discrete speed control, electrical machines, power quality.

I. INTRODUCTION

The purpose of this paper is to present a control solution for frequency increases found in system topology composed of different kinds of generators in parallel, such as a synchronous generator and an induction one.

These frequency increases happens when there is an active power of the system main load lower than the active power supplied by the induction generator. In the doctoral thesis presented by [1] this procedure was carried out by manual speed control of the primary DC (direct current) motor machine, that was coupled in the same axis of the induction machine. Another alternative used was to insert a linked resistive auxiliary load in a way that by controlling the active power of this one, the frequency control is achieved. The frequency set point of this frequency control is lightly higher to that related to the speed reference of the DC motor control loop, that was coupled to the synchronous machine. Thus, the frequency control is selective, i.e. when

the frequency is controlled by the auxiliary load, the speed control loop of the synchronous machine is inoperative and when the speed control loop of the synchronous generator is operative, the frequency control using the auxiliary load or ballast load, is not operating, in summary it is how the system normally operates. Thus, in the case of synchronous machine motorization, when the active power generated by the induction generator is greater than the active power of the main load, the frequency control operates, employing the auxiliary linked load [2]. The idea of inserting this linked auxiliary load has resulted in positive practical results in the laboratory assembly [1], [2] and [3]. Another possibility would be to use an alternative method. In order to avoid the synchronous machine motorization, this optional solution consists in the speed control of the induction generator, by using a discrete speed control for the DC machine of the group DC motor - asynchronous machine.

II. TORQUE VERSUS SLIP CURVE FOR AN INDUCTION MACHINE

Fig. 1 shows the torque (T) versus slip (S) curve for the induction machine. Taking into account (1) and (2) from the theory of electrical machines [4], [5] and [6] results:

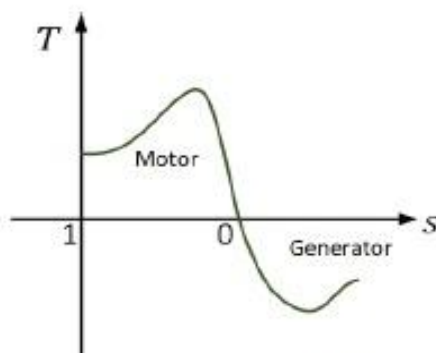


Fig. 1. Torque vs Slip curve for an induction machine.

$$k = \frac{P \times n_s}{60} \quad (1)$$

$$S_{\text{opt}} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

Where:

n_s , n_r , f and P are the synchronous speed of the rotating magnetic field [rpm], the rotational axis speed [rpm], the frequency [Hz] and the number of pair of poles of the machine, respectively.

Therefore the frequency of the voltage generated by the synchronous machine is directly related to the rotation speed of the machine.

For asynchronous induction machines, when the rotational speed is less than the synchronous speed, there is positive slip, according to (2), and the machine runs as motor. When the rotational speed is greater than the synchronous speed, the machine operates as a generator, and the slip is negative. The paper describes an automatic discrete speed control circuit for an induction generator, in such a way that in the case when occurs a decrease of the active power of the load fed by the electric system, constituted of a synchronous generator in parallel with the induction generator, there will be also the induction generator speed reduction. Thus, there is a reduction in its generated active power as well, in order to avoid the synchronous machine motorization, and also the system frequency increasing.

Fig. 2 shows a simplified diagram of the generators connected in parallel feeding the load, and the DC motors as primary machines of the synchronous generator (S.G.) and induction generator (A.G.) groups [2], [7], [8], [9] and [10]. The capacitor bank is connected to supply the reactive power absorbed by the induction machine (A.G.).

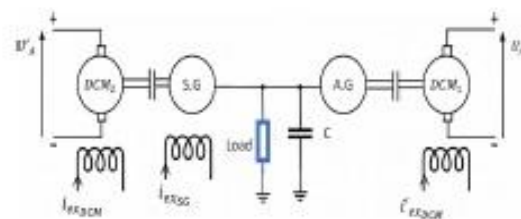


Fig. 2. A simplified diagram of the generators connected in parallel feeding the load.

The machine data are specified in Table I as follows:

Table I - Machine Specifications

Components	Parameters	Power	Rated current (A)	Rated voltage (V)	Rated speed (rpm)
DC motor data of asynchronous group	data of machine	1.7 kW	7.72	220	1500
DC motor data of synchronous machine group	data of machine	2.0 kW	9.1	220	1800
Synchronous machine data		2.0 kVA	5.0	230	1800
Asynchronous machine data		1.86 kW	7.5	220	1410

III. A DISCRETE SPEED CONTROL CIRCUIT FOR INDUCTION GENERATOR

The voltage U_s , which is that of the load active power transducer [11], [12], is obtained as the voltage drop across the R' precision resistor, shown in Fig. 3, for transduction of the active power from the load. This voltage will be used as the real input voltage to the comparator circuit using operational amplifiers (O.A.). The transducer voltage is for example, approximately 7.5 [V] for the rated active power of the load [11], considering the practical value of R' .

The transducer voltage, U , will be compared through the use of operational amplifiers (O.A.), to the threshold voltages V_{ref} , 6.0, 4.5, 3.0, and 1.5 [V], thus corresponding, respectively to 80%, 60%, 40%, and 20% of the rated active power of the load, powered by the generators in parallel.

The voltage U , is then, as already previously mentioned, approximately equal to 7.5 [V] when the active power of the load fed by the generators is equal to 100% of the rated active power of the load. If this voltage is 6.0[V] for the parallel operation of the generators, it corresponds to 80% of the rated active power of the load. Continuing, if this one is 4.5 [V], it corresponds to 60% of the rated active power of the load, 3.0 [V], when it corresponds to 40% and finally 1.5[V] when it corresponds to 20% of the rated active power of the load fed by the generators operating in parallel.

Fig. 3 shows the circuit that compares the active power of the load with some references, for the purpose of modifying the speed of the primary machine, DC motor of the induction generator group, which is gradually decreased when the active power of the load is also reduced.

There are five identical circuits in the part representing the operational amplifiers, resulting in 20 (twenty) operational amplifiers for comparisons of the real active power (U , voltage – positive input) with the V_{ref} threshold voltage (negative input), this one corresponding to the transition voltage for the output voltages of the operational amplifiers. These output voltages are respectively V_{sat} (O.A. saturation voltage) in the case when the positive input is approximately (hysteresis comparator are used), greater than the negative input and zero, when the contrary occurs, case in which the transition in the O.A. output voltage takes place.

Hysteresis comparators are used to avoid intermitted voltage transition at the output of the comparator, case when the positive input (voltage U) is oscillating around the negative input (threshold voltage). The comparator output voltage is V_{sat} , which can be V_{sat} or zero, feeding the NPN transistor base as shown in the circuit of Fig. 4, to energizing or de-energizing the relay coil, when these voltages are V_{sat} or zero, respectively. The transistor is in the conduction operation mode (closed switch), when the V_{sat} voltage is applied to the transistor base circuit, and is not conducting, (open switch), when the zero voltage is applied to the referred circuit. The schematic connection for the contacts is shown in Fig. 5, that also shows the command circuit for energizing or de-energizing the five relays coils for the purpose of enable the switching of the speed references of the DC motor of the induction generator group, in order to make feasible the discrete speed control of this unity.

When the active power of the load is in the range of about 0-20 % of the rated active power, the coil K_{25} is energized, resulting in $nrqf_5$ for the induction machine. In the range 20% to 40%, the coil K_{24} is energized, resulting in $nrqf_4$ for the induction machine. In the range 40% to 60%, the coil K_{23} is energized, resulting in $nrqf_3$ for the induction machine. In the range 60% to 80%, the coil K_{22} is energized, resulting in $nrqf_2$ for the induction machine. Finally, in the range 80% to 100%, the coil K_{21} is energized, resulting in $nrqf_1$ for the induction machine group as shown in Fig. 6.

Five speed references are provided for controlling the speed of the DC motor of the group of the induction generator, according to the speed control system described in

[1] and so results: $nrqf_1 > nrqf_2 > nrqf_3 > nrqf_4 > nrqf_5$. The active power supplied by the induction generator is also then gradually decreased, considering the decreasing of the active power of the load. This decrease is due to the induction machine speed reducing and consequently also to the slip decreasing, which is in accordance with Fig. 1 and (2).

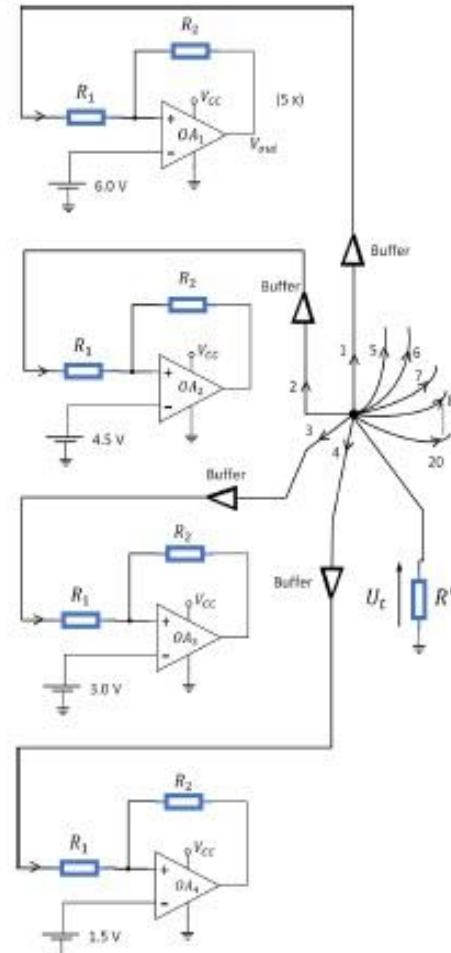


Fig. 3. Comparison circuits of the active power.

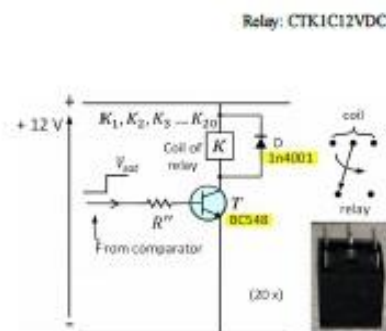


Fig. 4. Schematic connection for the energizing of relay coils used in the project

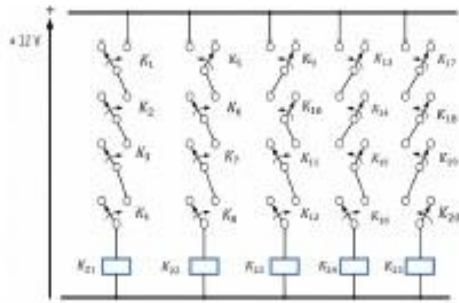


Fig. 5. Command circuit for supplying the speed reference voltages for the induction generator.

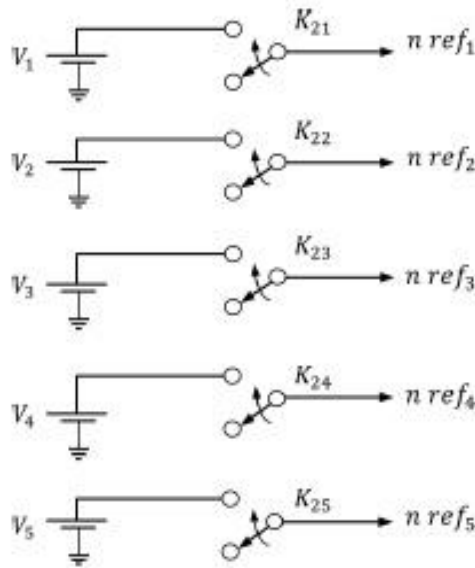


Fig. 6. Speed reference voltages for the induction generator group.

Therefore, as the speed of the induction generator gradually reduces, there are resulting speeds that are always greater than the synchronous speed. The synchronous machine (master) has a speed regulator, provided by the speed regulation of the DC motor of this group, in order to control the frequency and a voltage regulator to control the voltage of the electrical system formed by the parallel connection of a synchronous generator (master) and an induction generator (slave), according to [1]. As the speed of the induction machine gradually decreases, the power supplied by this one also decreases, in function of the load active power reducing. The master (synchronous machine) is responsible by the complement of the power required by the load. The machine is operating in the mode of induction machine fluctuating (slip near to zero), when the reference speed is $nref_6$, i.e. its speed is equal to the synchronous speed. It is emphasized that for operation of the machine as generator, its speed should be greater than the synchronous speed, as shown in Fig. 1. When this speed is lower, the machine operates as a motor.

The parallel operation of the generators is interesting to be applied in microgrid applications [13].

III. DESIGN OF THE DISCRETE SPEED CONTROL CIRCUIT

A. Hysteresis comparator

Considering the hysteresis of the comparator about 1% of V_{SAT} , the values of the resistances R_1 and R_2 can be, for instance, $R_1 = 1$ [k Ω] and $R_2 = 100$ [k Ω]. For the supply voltage of the operational amplifier (O.A.) equal to 15 [V], the saturation voltage, V_{SAT} is about 13 [V]. Fig. 7 shows the schematic representation of the considered hysteresis.

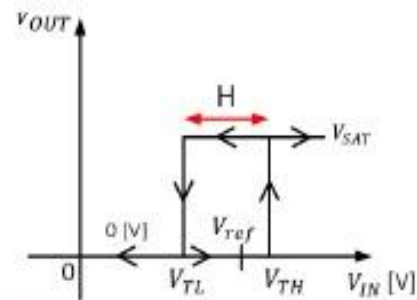


Fig. 7. Representation of the hysteresis comparator.

The variables V_{IN} , H and V_{ref} are the transducer voltage of the active power of the load, U_t , the hysteresis and the threshold V_{ref} voltages, considered equal to 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 [V], respectively, as shown in Fig. 3.

The output voltage of the hysteresis comparator (V_{out}), was considered as being $V_{SAT} \approx 13$ [V] or 0 [V], respectively. The transition voltages V_{TH} , V_{TL} and hysteresis H can be expressed using (3), (4) and (5).

$$V_{TL} = \frac{[V_{ref} \times (R_1 + R_2)] - R_1 \times V_{OL}}{R_2} \quad (3)$$

$$V_{TH} = \frac{[V_{ref} \times (R_1 + R_2)] - R_1 \times V_{OH}}{R_2} \quad (4)$$

$$H = V_{TH} - V_{TL} = \frac{R_1}{R_2} \times (V_{OH} - V_{OL}) \quad (5)$$

Where $V_{OH} = V_{SAT} \approx 13$ [V] and $V_{OL} = 0$ [V]. Therefore, for V_{ref} voltage values equal to 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 [V], results in (6):

$$\text{if } V_{ref} = 1.5 \text{ [V]}$$

$$V_{Tn} \dot{\iota} \frac{1.5 \times (1+100)}{100} = 1.515 \text{ [V]}$$

$$V_{Tn} \dot{\iota} \frac{[1.5 \times (1+100) - 1 \times 13]}{100} = 1.385 \text{ [V]}$$

$$\text{if } V_{ref} = 3.0 \text{ [V]} \rightarrow V_{Tn} = 3.03 \text{ [V]} \text{ and } V_{Tn} = 2.9 \text{ [V]}$$

$$\text{if } V_{ref} = 4.5 \text{ [V]} \rightarrow V_{Tn} = 4.545 \text{ [V]} \text{ and } V_{Tn} = 4.415 \text{ [V]}$$

$$\text{if } V_{ref} = 6.0 \text{ [V]} \rightarrow V_{Tn} = 6.06 \text{ [V]} \text{ and } V_{Tn} = 5.93 \text{ [V]}$$

(6)

B. Base resistance of the transistor - R'' (see Fig. 4)

Considering the relay coil resistance equal to 400 $[\Omega]$, results for the collector current (I_c):

$$I_c \dot{\iota} \frac{12}{400} = 30 \text{ [mA]} \quad (7)$$

Also for β transistor current gain equal to 10, the base current is equal to 3.0 [mA]. In this way, the operation of the transistor as a key is achieved. So the R' resistor value is:

$$R'' \dot{\iota} \frac{(V_{SAT} - 0.7) \times 10^3}{3.0} = \frac{(13 - 0.7) \times 10^3}{3.0} = 4.1 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (8)$$

whose the commercial value of precision resistance $R'' = 4.12 \text{ [k}\Omega\text{]}$.

C. Calculation of resistance R' - active power transducer of the load (see Fig. 3)

The rated active power of the load, P_{load} , can be calculated, using (9). The three-phase rated load current (I_{load}) was considered equal to 5 [A] and the rated load voltage (V_{gr}) equal to 220 [V].

$$P_{load} = \sqrt{3} \times V_{gr} \times I_{load} = \sqrt{3} \times 220 \times 5 = 1905 \text{ [W]} \quad (9)$$

According to [11],[12], the load active power transducer output current, for this condition is equal to 20 [mA] and for the voltage drop across the resistor R' equal to 7.5 [V], results:

$$R' \dot{\iota} \frac{7.5}{20} = 0.375 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (10)$$

whose the commercial value of precision resistance $R' = 374 \text{ [}\Omega\text{]}$.

D. Reference speed range

Fig. 8 shows the active power distribution between the generators for operation in 60 [Hz], whose the synchronous speed corresponds to 1800 [rpm]. In the speed of 1848 [rpm], equal active power contribution of each generator is verified. Thus, results for the asynchronous machine: $n_{ref} = 1848$ [rpm]; $n_{ref2} = 1836$ [rpm]; $n_{ref3} = 1824$ [rpm]; $n_{ref4} = 1812$ [rpm] and $n_{ref5} = 1800$ [rpm], considering speed step equal to 12 [rpm], corresponding to $V_1 = 10$ [V], $V_2 = 9.94$ [V], $V_3 = 9.87$ [V], $V_4 = 9.80$ [V] and $V_5 = 9.74$ [V] (see Fig. 6).

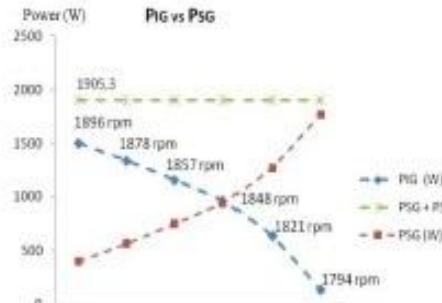


Fig. 8. Active power distribution between the generators - $f = 60 \text{ Hz}$ [1].

Fig. 9 shows the active power distribution between the generators for operation in 55 [Hz], whose the synchronous speed corresponds to 1650 [rpm]. The active power of the load in this figure is only a little slightly greater than the rated active power of the load, so for the purpose of determining the speed n_{ref} , the experimental results shown in this figure can be considered. In the speed of 1702 [rpm], equal active power contribution of each generator is verified. Thus, results for the asynchronous machine: $n_{ref} = 1702$ [rpm]; $n_{ref2} = 1689$ [rpm]; $n_{ref3} = 1676$ [rpm]; $n_{ref4} = 1663$ [rpm] and $n_{ref5} = 1650$ [rpm], considering the equidistant step of speed equal to 13 [rpm], corresponding to $V_1 = 9.21$ [V], $V_2 = 9.14$ [V], $V_3 = 9.07$ [V], $V_4 = 9.00$ [V] and $V_5 = 8.93$ [V] (see Fig. 6).

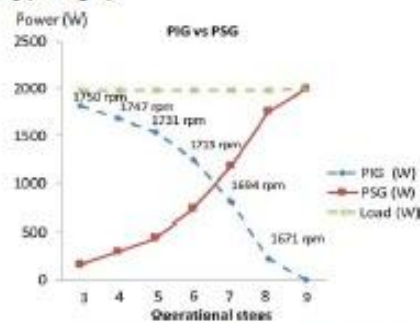


Fig. 9. Active power distribution between the generators - $f = 55 \text{ Hz}$ [2].

When the synchronous speed is reached, the active power contribution of the synchronous generator PSG is the active power contribution of the synchronous machine.

Fig. 10 shows the block diagram of the speed control system of the primary DC machines, specifically, of the synchronous group DC machine, for

frequency of 55 [Hz], resulting therefore in synchronous speed equal to 1650 [rpm], detailed design in according to [1], [2].

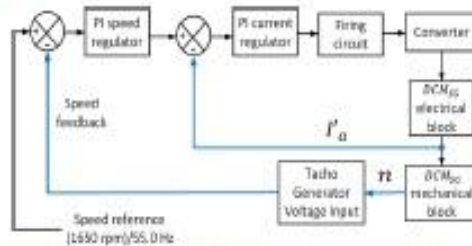


Fig. 10. Block diagram of the DC machine speed control system.

IV. CONCLUSION

A detailed design procedure to implement a discrete speed control system for the induction machine was presented in the paper. The great advantage of this alternative method is that there isn't current harmonic injection done by the load, comparatively to the case when the auxiliary linked resistive load was considered and implemented in [1] and [2]. It was used in this case a controlled three phase resistive CA (alternating current) ballast load, employing anti-parallel thyristors per phase. This aspect is favorable related to power quality improvement. In the case of low main load powered by the generators operating in parallel, the resulting consequences as the increase of the system frequency and also the synchronous machine motorization, are avoided, by using the proposed automatic discrete speed control system for the asynchronous machine. It consists in the reduction of the induction generator active power generation, by means of the speed decrease of this asynchronous machine. This action is necessary and allows to eliminate the excess of active power generation, related to the active power of the load being fed by the generators.

In reason of this resulting power excess from energy balance between generation and load, the frequency increases and also the synchronous machine motorization takes place. Therefore the presented simple and low cost alternative control solution to avoid the synchronous machine motorization is very interesting to be used.

The discrete speed control system proposed for the induction generator is also useful for an equitable load distribution for these generators operating in parallel. This fact consists in another advantage of the presented project procedure. Therefore, the proposal of the described discrete speed control system original design, consists itself in the main contribution of the paper.

References

- [1] V. Z. Silva, "Dynamic evolution and analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system," Ph.D. dissertation, Federal University of Itajubá - UNIFEI, Brazil, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.unifei.edu.br/sgm/handle/123456789/2200>
- [2] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and C. E. G. Ogozola, "Alternatives to control the frequency increase in an electric system with synchronous and induction generators in parallel operation mode," *Electric Power Systems Research*, vol. 180, p. 106136, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106136>

Research, vol. 180, p. 106136, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106136>

- [3] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corréa, "Analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system using a ballast load as a regulation system under transient conditions," *IJESAR*, 2018, pp. 22-37. [Online]. Available: <http://ijesar.in/index.php/ijesar/article/view/112>

[4] A. J. J. Rezek, *Basic fundamentals of electrical machines: theory and tests* (in portuguese), Synergia, Rio de Janeiro - RJ and ACTA, Itajubá - MG, 2011.

- [5] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, and B. James, *Electric machinery*, McGraw-Hill New York, 2003. [Online]. Available: <https://www.mheducation.com/highered/product/fitzgerald-kingsley-a-electric-machinery-sixms/M9780073380469.html>

[6] J.-M. Chapallat, P. Eichenberger, and G. Fischer, *Manual on pumps used as turbines*, Vieweg Braun-schweig, Germany, 1992. [Online]. Available: <https://skat.ch/book/manual-on-pumps-used-as-turbines-volume-1/>

- [7] F. FROHR and F. ORTTENBURGUER, *Introduction to electronic control* (in spanish), Marcombo SA, Siemens Aktiengesellschaft, 1986.

[8] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corréa, "Transients analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system," in *COBEP 2017*, pp. 1-6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8257236>

- [9] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corréa, "Analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an isolated electric system," in *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, IEEE, 2017, pp. 1-8. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7972459>

[10] V. Z. Silva, A. J. J. Rezek, and R. D. L. Corréa, "Novel topology analysis of synchronous and induction generators in parallel operation mode in an offshore isolated electric system," in *The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE*, 2017, pp. 1-10. [Online]. Available: <http://www3.f.f.mdp.edu.ar/clagtee2017/book.html>

- [11] ETP30 Active power transducer, ABB, Hartmann and Braun N 00312/4 Datasheet, 2005. [Online]. Available: https://www.nifatron.com.br/manuais/1548262113_ETP30_ETO30.pdf

[12] F. W. S. Carvalho, "Variable frequency transformer applied to hydro electric generation with variable speed (in portuguese)," Master's thesis, Federal University of Itajubá - UNIFEI, Brazil, 2011. [Online]. Available: <https://repositorio.unifei.edu.br/sgm/handle/123456789/1367>

- [13] F. D. Wijaya, L. N. Gajayana, and H. P. Wijaya, "Parallel operation synchronous and induction generator on microgrid testbed," in *2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, IEEE, 2017, pp. 1-5. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8250476>