



GSE/020

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO VIII
GRUPO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

O REGULADOR DE INDUÇÃO COMO ELEMENTO CONTRIBUINTE PARA O AUMENTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Ivan E. Chabu *

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

José Roberto Cardoso

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

RESUMO

Neste trabalho será abordado o Regulador de Tensão de Indução como elemento condicionador de energia elétrica em sistemas industriais. A capacidade desse equipamento de produzir tensões variáveis em largas faixas, sem necessidade de comutações e contatos móveis, possibilita a obtenção de sistemas de alimentação ou de regulação de tensão com elevadas confiabilidade e capacidade de sobrecarga. O ilimitado número de ciclos de variação ou regulação além da ausência de harmônicos gerados, contribui para o aumento da disponibilidade do equipamento e da qualidade da energia oferecida. Será apresentada a descrição geral dos reguladores de indução trifásicos e monofásicos, bem como seu modelamento e características. Serão descritas as aplicações usuais e potenciais em instalações industriais e em sistemas elétricos de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE: Regulador de Tensão, Variador de Indução, Transformador Ajustável, Fonte variável.

1.0 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos devem apresentar requisitos mínimos de qualidade tais como tensão estável, ausência de perturbações e ruídos e a maior disponibilidade possível. Do lado dos consumidores, principalmente industriais, duas situações podem se apresentar: 1- Instalações dotadas de equipamentos sensíveis ou alimentados por redes que apresentam acentuada variação de tensão por limitação do sistema de distribuição local; 2 – Instalações dotadas de equipamentos de elevada potência que requerem tensões variáveis em grandes faixas para sua operação. Nos dois casos, são empregados sistemas condicionadores de tensão, que se não forem adequadamente concebidos e dimensionados, comprometem tanto a instalação que alimentam

quanto a rede elétrica à qual estão conectados, propagando perturbações para outros consumidores e diminuindo portanto a qualidade da energia disponível no sistema de distribuição.

Os equipamentos condicionadores de tensão de grande potência comumente utilizados, são os transformadores com derivações comutáveis por meio de comutador sob carga, ou sistemas recortadores de tensão baseados em eletrônica de potência. No primeiro caso as faixas de variação são estreitas, o ajuste é feito em degraus, com pequenos transitórios de comutação e, em sistemas que requerem ajuste muito freqüente, o severo desgaste do comutador resulta em grande incidência de manutenção e redução da disponibilidade do equipamento. No segundo caso, os recortadores a tiristores permitem grandes faixas de variação, ajuste contínuo, porém introduzem sérios problemas de harmônicos e ruídos elétricos na instalação e na rede. Em algumas aplicações de baixa tensão de saída, utilizam-se ainda os variadores de escovas de deslocamento helicoidal, que têm como fator limitante a existência dos contatos deslizantes. Todos os equipamentos acima citados, apresentam sérias restrições a eventuais sobrecargas além de serem muito susceptíveis a curto-circuitos na saída.

O regulador de indução é uma solução para o condicionamento de tensão em sistemas de grande porte que apresenta muitas e expressivas vantagens sobre os equipamentos anteriormente citados, tendo como aspecto negativo apenas um custo ligeiramente superior para a mesma potência e faixa de variação. Sua construção é similar à da máquina assíncrona de rotor bobinado, constituindo-se em um transformador de campo rotativo e fase variável na configuração trifásica, e num transformador de acoplamento variável na configuração monofásica. Uma adequada conexão entre enrolamentos do primário e secundário produz

tensão variável na saída em função do ângulo relativo entre estator e rotor. A faixa de variação da tensão é completamente percorrida numa excursão bastante limitada desse ângulo sendo o acesso ao rotor feito por meio de cabos flexíveis, dispensando o uso de contatos móveis como anéis coletores e escovas. O posicionamento entre rotor e estator é realizado por um simples sistema mecânico motorizado.

Dessa forma o regulador de indução permite uma variação contínua da tensão de saída, com a vantagem de não possuir nenhum elemento de desgaste ou contato móvel. Isso permite uma alta confiabilidade e capacidade de sobrecarga, ilimitada frequência de ajustes e ciclos de variação da tensão, além de apresentar bom comportamento durante curto-circuitos. Como a variação é obtida por composição fasorial de duas tensões senoidais o regulador de indução não introduz nenhum tipo de harmônica ou perturbação, nem para a carga e nem para a rede de alimentação. Tais fatos são de grande relevância portanto na qualidade da energia condicionada por este equipamento, e no sistema de distribuição ao qual é conectado [4].

2.0 DESCRIÇÃO GERAL DO REGULADOR DE INDUÇÃO

Os reguladores de indução têm construção eletromagnética similar à das máquinas assíncronas de rotor bobinado. Assim, tanto o enrolamento primário como o secundário são distribuídos em ranhuras executadas ao longo de núcleos cilíndricos, separados por um entreferro uniforme. O enrolamento primário, usualmente alojado no rotor, é posicionado mecanicamente em relação ao secundário permitindo desde o alinhamento dos eixos dos enrolamentos, até a total oposição dos mesmos, numa excursão de 180° elétricos. Para reguladores típicos, construídos com 4 pólos magnéticos, isso resulta num movimento máximo do rotor de 90° geométricos.

O resfriamento dos reguladores de indução pode ser a ar, com ventilação natural ou forçada, ou por meio de óleo isolante como um transformador convencional. A tecnologia de construção dos reguladores de indução é basicamente a mesma das máquinas elétricas rotativas, podendo ser executados com tensões nominais usuais até a classe de 15kV. As potências exequíveis deste tipo de equipamento vão desde décimos de kVA até aproximadamente 10 MVA. As correntes de saída diretas, sem transformação, alcançam até aproximadamente 7 kA.

2.1 Funcionamento dos reguladores trifásicos

Nesta configuração, a alimentação do enrolamento primário por um sistema de tensões trifásico, dá origem a uma onda de campo magnético rotativo no entreferro com velocidade síncrona o qual induz tensões de amplitude e frequência constantes no

enrolamento secundário. Sendo $|V_1|$ o módulo da tensão por fase da linha, aplicada ao primário, o módulo da tensão induzida por fase no secundário será:

$$|E_2| = a \cdot |V_1| \quad (1)$$

onde $a = N_{2ef} / N_{1ef}$ é a relação de transformação do regulador, igual à razão dos números de espiras efetivas por fase dos enrolamentos secundário e primário, respectivamente N_{2ef} e N_{1ef} .

O deslocamento do rotor em relação ao estator altera o alinhamento dos eixos dos enrolamentos e conseqüentemente o ângulo de fase da tensão induzida no secundário em relação à fase da tensão de linha. Para o primário alojado no rotor, um deslocamento do mesmo em sentido contrário ao do campo rotativo, provoca um atraso na tensão induzida no secundário, e a Equação 1 pode ser reescrita, agora na forma fasorial:

$$E_2 = a \cdot V_1 \cdot e^{-j\theta} \quad (2)$$

onde θ é o ângulo de deslocamento relativo entre rotor e estator, em graus elétricos, medido a partir do alinhamento dos eixos dos enrolamentos primário e secundário. Conectando-se adequadamente estes dois enrolamentos configurando um autotransformador trifásico, torna-se possível obter uma tensão de saída por fase, V_2 , que é a composição fasorial da tensão de linha com a tensão induzida de fase variável no secundário. A representação esquemática dessa conexão, típica do regulador de indução trifásico, pode ser observada na Figura 1.

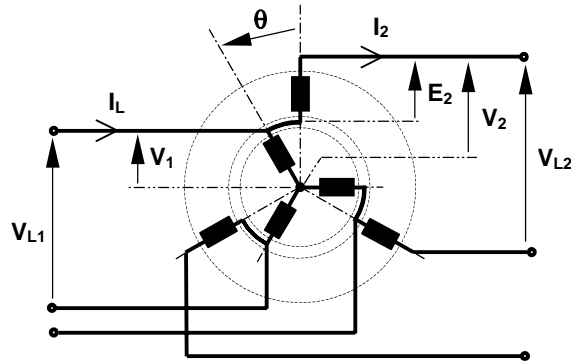


FIGURA 1 – Conexão típica de regulador de indução trifásico

Dessa forma, a tensão de saída por fase do regulador é dada por:

$$V_2 = V_1 + E_2 = V_1 \cdot (1 + a \cdot e^{-j\theta}) \quad (3)$$

Nota-se que essa tensão de saída tem agora módulo variável em função do ângulo θ , variando desde o valor máximo $V_{2max} = V_1 \cdot (1 + a)$ para $\theta=0^\circ$ até o valor mínimo $V_{2min} = V_1 \cdot (1 - a)$ para $\theta=180^\circ$. O diagrama fasorial da Figura 2 ilustra o comportamento da tensão de saída resultante.

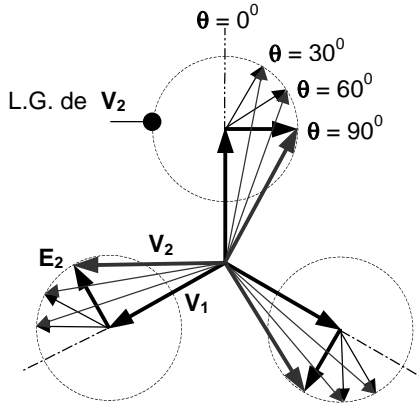


FIGURA 2 – Diagrama fasorial do regulador de indução trifásico

A relação de correntes no regulador trifásico resulta do equilíbrio das ondas rotativas de força magnetomotriz (F.m.m.) primária e secundária. No caso ilustrado, enquanto a tensão induzida no secundário resulta atrasada em relação à do primário, a corrente nesse último enrolamento, I_1 , deve estar adiantada em relação à corrente secundária, I_2 , a fim de garantir o confronto de F.m.m. Tem-se então:

$$I_1 = a \cdot I_2 \cdot e^{+j\theta} \quad (4)$$

Nota-se na Figura 2 que a faixa de excursão da tensão de saída depende apenas da relação de transformação a . Valores pequenos dessa relação, produzem reguladores adequados para operar como estabilizadores de tensão, com regulações típicas de +/- 10% ou +/- 15%. Relações de transformação próximas da unidade produzem reguladores que permitem variação de tensão de saída desde zero até o dobro da tensão de alimentação. A condição ideal de utilização do regulador é aquela na qual o centro da faixa de tensão de saída coincide com a tensão de linha de alimentação. Quando essa condição não pode ser atendida, utilizam-se transformadores adaptadores de tensão associados ao regulador.

2.2 Funcionamento dos reguladores monofásicos

Nesta configuração, a alimentação do primário por linha monofásica produz um campo magnético pulsante no tempo com a frequência da rede, porém estacionário no espaço e alinhado com o eixo do enrolamento. Dessa forma a indução de tensão no enrolamento secundário dependerá do grau de acoplamento magnético entre enrolamentos e portanto da posição relativa de seus eixos. Uma modificação na posição entre rotor e estator altera portanto o módulo da tensão induzida no secundário, enquanto a fase dessa tensão permanece igual à fase da tensão de linha, desconsiderando-se as quedas. A configuração dos enrolamentos produz um campo magnético que, embora estacionário, tem distribuição espacial senoidal ao longo do entreferro. Desse modo o

acoplamento entre primário e secundário depende do cosseno do ângulo θ , e a tensão induzida no secundário é dada por:

$$E_2 = a \cdot V_1 \cdot \cos \theta \quad (5)$$

Aqui também é usual a conexão dos enrolamentos formando um autotransformador monofásico, de modo que a tensão de saída total se torna, a menos das quedas, a soma algébrica da tensão induzida no enrolamento secundário com a tensão de linha. Essas conexões bem como o diagrama fasorial de tensões estão ilustrados na Figura 3.

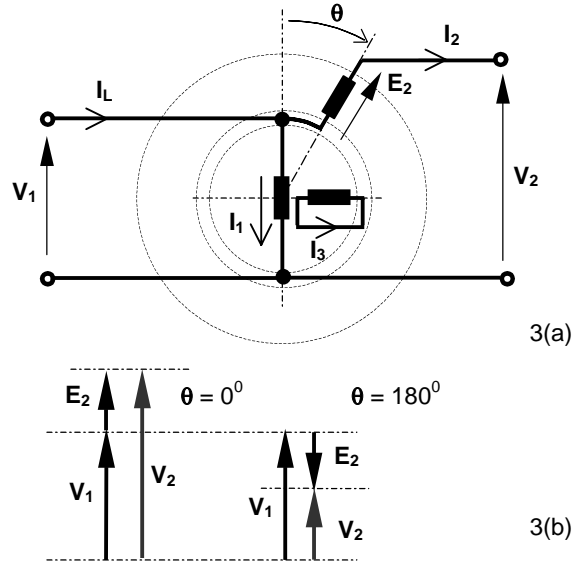


FIGURA 3 – Conexões e diagrama fasorial de regulador de indução monofásico

A tensão de saída resultante no regulador de indução monofásico é dada por:

$$V_2 = V_1 + E_2 = V_1 \cdot (1 + a \cdot \cos \theta) \quad (6)$$

Observa-se ainda na Figura 3(a) que existe um terceiro enrolamento alojado no rotor, chamado de compensação. O mesmo, com número de espiras efetivas N_{3ef} , está posicionado em quadratura com o enrolamento primário tendo seus terminais permanentemente curto-circuitados. Sua função é garantir o equilíbrio das F.m.m. entre rotor e estator para qualquer posição θ , de modo a controlar a reatância série do enrolamento secundário. Para ângulos diferentes dos extremos, $\theta=0^\circ$ ou $\theta=180^\circ$, o equilíbrio da F.m.m. secundária pelo enrolamento primário não é completo, devido à diminuição do acoplamento magnético entre ambos. Dessa forma a existência do enrolamento de compensação, ortogonal ao primário e curto-circuitado, provoca a circulação de uma corrente I_3 pelo mesmo, que complementa adequadamente a F.m.m. do primário garantindo o equilíbrio total da F.m.m. secundária. A Figura 4 ilustra a atuação do enrolamento de compensação, mostrando a composição dos vetores de F.m.m..

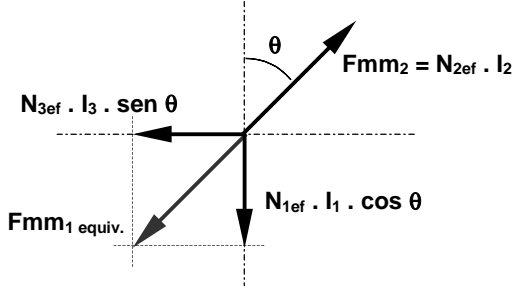


FIGURA 4 – Efeito do enrolamento de compensação

3.0 MODELAMENTO DOS REGULADORES DE INDUÇÃO

Devido ao acoplamento variável entre primário e secundário e à conexão como autotransformador, os modelos normais de transformadores não se aplicam diretamente aos reguladores de indução. Embora para a configuração trifásica seja possível obter um modelo direto a partir de considerações das relações de tensões e correntes [1], a análise completa tanto para o regulador trifásico como para o monofásico deve ser feita por uma metodologia mais geral. A análise tensorial é um método que se apresenta adequado, já que independente das conexões dos enrolamentos, sempre permite o equacionamento a partir de um circuito primitivo elementar devidamente transformado por tensores de conexão, que relacionam tensões e correntes entre circuitos [3]. Serão apresentadas as equações finais e circuitos equivalentes para os reguladores de indução derivados da análise tensorial, sendo omitidas as passagens intermediárias, os circuitos primitivos e os tensores de conexão, já que não fazem parte do escopo do presente trabalho [2].

3.1 Modelamento dos reguladores trifásicos

Nesta configuração os parâmetros e circuitos serão sempre por fase. O diagrama de referência é o da Figura 1, e as grandezas de interesse são as totais vistas pelos terminais de entrada e saída da fase do regulador, como um quadripolo. A aplicação da análise tensorial resulta então nas seguintes equações gerais do regulador trifásico:

$$V_1 = Z_a \cdot I_L - (Z_a + a \cdot Z_m \cdot e^{+j\theta}) \cdot I_2 \quad (7)$$

$$V_2 = (Z_a + a \cdot Z_m \cdot e^{-j\theta}) \cdot I_L - (Z_a + Z_b + 2 \cdot a \cdot Z_m \cdot \cos \theta) \cdot I_2 \quad (8)$$

onde os parâmetros são os seguintes:

$Z_a = z_a + Z_m$: impedância total do primário
 $Z_b = z_b + a^2 \cdot Z_m$: impedância total do secundário
 z_a : impedância complexa de dispersão primária
 z_b : impedância complexa de dispersão secundária
 Z_m : impedância complexa de magnetização

O desmembramento das Equações 7 e 8 indica de forma mais intuitiva o comportamento do regulador de

indução. Assim, após uma adequada manipulação, obtém-se:

$$I_L = V_1/Z_a + I_2 + a \cdot (Z_m/Z_a) \cdot I_2 \cdot e^{+j\theta} \quad (9)$$

$$V_2 = V_1 + a \cdot (Z_m/Z_a) \cdot V_1 \cdot e^{-j\theta} - (Z_b - a^2 \cdot Z_m^2/Z_a) \cdot I_2 \quad (10)$$

O primeiro termo do segundo membro da Equação 9 é simplesmente a corrente absorvida em vazio pelo regulador, enquanto o terceiro termo é, baseado na Equação 4, a corrente secundária referida ao primário, I_1 . As Equações 9 e 10 sugerem um circuito equivalente por fase para o regulador de indução trifásico conforme indicado na Figura 5.

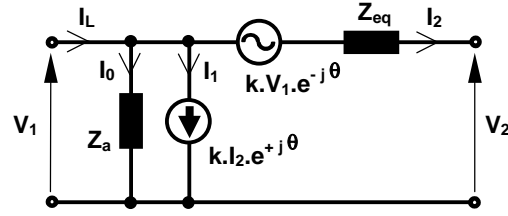


FIGURA 5 – Circuito equivalente por fase para regulador de indução trifásico

Nesse circuito, as fontes de tensão e corrente são vinculadas, e o fator $k = a \cdot (Z_m/Z_a)$ é a relação de transformação generalizada, tomando-se em conta as quedas na impedância de dispersão primária. Note-se que normalmente $z_a \ll Z_m$, de modo que $k \sim a$. Na Figura 5 tem-se ainda a impedância série equivalente,

$$Z_{eq} = (Z_b - a^2 \cdot Z_m^2/Z_a) = (z_a \cdot z_b + Z_m \cdot z'_{2cc}) / (z_a + Z_m) \quad (11)$$

onde $z'_{2cc} = a^2 \cdot z_a + z_b$ é a impedância total de dispersão do regulador, referida ao enrolamento secundário. Aqui também tem-se normalmente z_a e z_b muito menores que Z_m , de modo que $Z_{eq} \sim z'_{2cc}$.

3.2 Modelamento dos reguladores monofásicos

Nesta configuração o equacionamento também é obtido para grandezas globais, como um quadripolo. O diagrama de referência é o da Figura 3-(a). A análise tensorial produz no caso as equações gerais para o regulador monofásico dadas por:

$$V_1 = Z_a \cdot I_L - (Z_a + a \cdot Z_m \cdot \cos \theta) \cdot I_2 \quad (12)$$

$$V_2 = (Z_a + a \cdot Z_m \cdot \cos \theta) \cdot I_L - (Z_a + Z_b + 2 \cdot a \cdot \cos \theta) \cdot I_2 + a^2 \cdot b \cdot Z_m \cdot \sin \theta \cdot I_3 \quad (13)$$

$$V_3 = 0 = -(a^2 \cdot b \cdot Z_m \cdot \sin \theta) \cdot I_2 + Z_c \cdot I_3 \quad (14)$$

onde os parâmetros adicionais são os seguintes:

$Z_c = z_c + a^2 \cdot b^2 \cdot Z_m$: impedância total de compensação
 z_c : Impedância de dispersão de compensação
 $b = N_{3ef} / N_{2ef}$: relação de transformação entre enrolamentos de compensação e secundário

Procedendo-se aqui também ao desmembramento das Equações 12, 13 e 14, resulta um circuito equivalente que em forma é similar ao do regulador trifásico, visto na Figura 5. A diferença ocorre na vinculação das fontes, que enquanto no caso trifásico é dada pelo fasor unitário $e^{-j\theta}$ para tensão e $e^{+j\theta}$ para corrente, no caso monofásico é dada pela função $\cos \theta$ para ambas as fontes. Outra diferença em relação ao circuito do regulador trifásico está no comportamento da impedância série equivalente, Z_{eq} . Enquanto no trifásico essa impedância é constante, dada pela Equação 11, no caso monofásico tem-se uma impedância variável no ângulo θ , dada por:

$$Z_{eq} = Z_b - a^2 \cdot (Z_m^2/Z_a) \cdot \cos^2\theta - a^4 \cdot b^2 \cdot (Z_m^2/Z_c) \cdot \sin^2\theta \quad (15)$$

4.0 CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DOS REGULADORES DE INDUÇÃO

Do ponto de vista quantitativo, todo o comportamento dos reguladores de indução pode ser obtido pela solução das equações ou dos circuitos equivalentes apresentados na seção anterior. Alguns aspectos importantes no entanto, podem ser explicitados qualitativamente para melhor caracterizar este tipo de equipamento. Uma propriedade notável a ser examinada é a característica do módulo da tensão de saída em função do ângulo θ entre rotor e estator, que inclusive é o que diferencia o regulador de indução dos demais equipamentos condicionadores de tensão. Na Figura 6 estão representadas essas características para o regulador trifásico e monofásico, para vários valores da relação de transformação a , que define a amplitude da faixa de variação da tensão de saída.

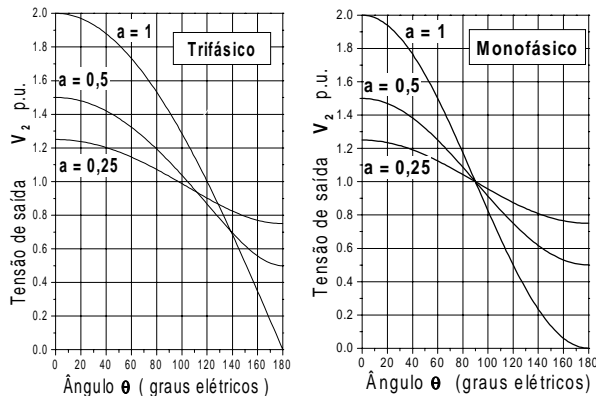


FIGURA 6 – Características $V_2 \times \theta$ típicas do regulador de indução

Cabe observar que no regulador trifásico, existe uma variação na fase da tensão de saída, como é visto no diagrama fasorial da Figura 2. Na grande maioria das aplicações essa propriedade não é relevante, embora possa ser construído o regulador trifásico de corpo duplo, onde a tensão de saída resulta sempre em fase com a tensão de entrada.

Outra propriedade importante dos reguladores de indução é a característica da impedância de curto-circuito, Z_{cc} , vista pela linha de alimentação em função do ângulo θ , ou em função da tensão de saída. A Figura 7 mostra estas características para o regulador trifásico e monofásico.

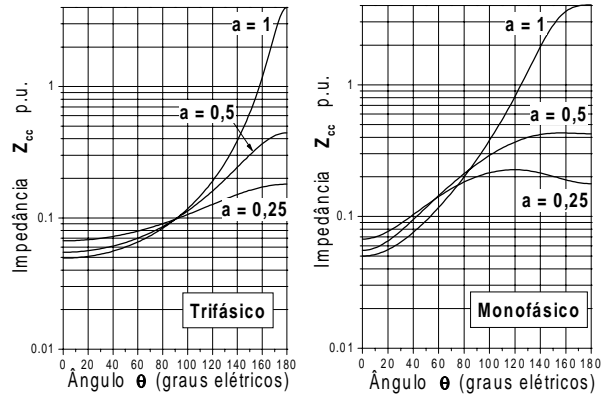


FIGURA 7 – Características $Z_{cc} \times \theta$ típicas do regulador de indução

Observa-se na Figura 7 que para ângulos θ elevados, o que significa tensões de saída próximas ao limite inferior da faixa de variação, o regulador de indução limita mais fortemente as correntes de curto-circuito. Em reguladores de faixa larga, ($a \sim 1$), a corrente de curto pode tornar-se menor que a nominal, indicando que qualquer proteção efetiva deve ser colocada no secundário ou sensoreando a corrente exclusiva do primário, I_1 , e não a corrente da linha de alimentação, I_L . Como o regulador de indução é dotado de entreferro, a sua corrente de magnetização é sensivelmente superior à de um transformador convencional. Essa aparente desvantagem, no entanto, é facilmente contornada com compensação capacitiva a montante do regulador se necessário.

5.0 APLICAÇÕES DOS REGULADORES DE INDUÇÃO

Um primeiro grupo de aplicações típicas dos reguladores de indução é na estabilização de tensão em instalações de médio e grande portes alimentadas por linhas fracas ou muito carregadas, especialmente quando a variação de carga é pronunciada. Neste caso, a flutuação de tensão normalmente excede os limites admissíveis, comprometendo os processos e equipamentos instalados. Reguladores convencionais dotados de comutadores sob carga não são adequados a esse perfil de aplicação, já que as correções ao longo do tempo superam em muito o número de manobras admissível do comutador. Nessas aplicações são empregados normalmente reguladores de indução trifásicos de faixa estreita, tipicamente de 15 a 20%. A possibilidade de ajuste contínuo da tensão e o ilimitado número de ciclos de variação são os fatores decisivos para a sua escolha.

Um outro grupo importante de aplicação dos reguladores de indução é na alimentação de equipamentos ou processos que requerem tensão variável na sua operação. Casos típicos são processos térmicos como fornos de fusão e refino, apoio elétrico em fornos de vidro, processos de eletrólise e galvanoplastia e vaporizadores de grande porte. Nesses casos, com potências de muitas centenas até poucos milhares de kW, é normal a utilização de reguladores trifásicos ou monofásicos com faixa larga, tipicamente de 50 a 70%. É também comum a utilização de baixas tensões de saída, variáveis entre 50 e 200 V e correntes de até 7kA. Nessas situações, para otimizar o dimensionamento do regulador, são utilizados transformadores auxiliares adaptadores de tensão, de modo a situar a tensão de entrada no centro da faixa de tensão de saída. Nesse tipo de processos, a necessidade de variação contínua da tensão e a largura da faixa são os fatores que direcionam para a escolha do regulador de indução. Nessas instalações a utilização de sistemas recortadores de tensão baseados em tiristores não são recomendados, já que introduzem um elevado conteúdo harmônico que compromete o próprio funcionamento do sistema, além de propagar ruídos intensos pela linha. Nas aplicações específicas de eletrólise e processos galvânicos, a saída do regulador de indução é retificada por pontes de onda completa não controlada (diodos). Obtém-se assim a saída variável em corrente contínua, com baixo nível de ondulação, ao contrário dos retificadores controlados a partir de tensão fixa, cujo "ripple" elevado compromete seriamente a qualidade do processo.

Os reguladores de indução de faixa larga ($a \sim 1$) também encontram aplicação importante em laboratórios de ensaios de transformadores, máquinas rotativas e cabos elétricos. Nesse segmento, funcionam como a fonte de tensão principal, variável de zero ao dobro da tensão de entrada, permitindo grande versatilidade e capacidade de sobrecargas momentâneas nos ensaios. Os reguladores de indução podem operar ainda como indutores praticamente puros, com indutância continuamente variável numa faixa de até 1:40 [2].

Um campo de aplicação potencial dos reguladores de indução é em sistemas radiais de distribuição de energia, especialmente nas regiões onde o custo de manutenção é um componente forte da operação. Nestes casos, reguladores trifásicos ou monofásicos de faixa estreita, até o nível de tensão de 13,8 kV, podem competir com os reguladores convencionais de comutador sob carga, se considerado o custo global ao longo do tempo. Para esta aplicação, o regulador de indução é virtualmente isento de qualquer intervenção ao longo de toda a sua vida útil.

6.0 CONCLUSÕES

Foi abordado ao longo do trabalho o regulador de indução como elemento condicionador de tensão

principalmente em instalações industriais. Foram apresentadas a construção e o funcionamento dos reguladores trifásicos e monofásicos, bem como seu modelamento. As suas características principais, como variação contínua da tensão em largas faixas, sem necessidade de nenhum tipo de comutação ou contato móvel, além da total ausência de geração de harmônicos, tornam a utilização desses reguladores um importante fator de incremento da qualidade da energia fornecida às instalações e às linhas onde estão conectados. Seu emprego em grupos de aplicações típicas e potenciais é quase sempre justificado, quando feitas adequadamente as análises de custo e benefício ao longo do tempo.

7.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] FALCONE, A. G. ; CHABU, I. E. Circuito Equivalente Para Regulador de Tensão Tipo Indução; Revista Mundo Elétrico – N^o 357 – São Paulo - 1989
- [2] CHABU, I.E. Modelamento de Reguladores de Tensão de Indução; Dissertação de Mestrado – EPUSP São Paulo – 1990.
- [3] BEWLEY, L.V. Tensor Analysis of Electric Circuits and Machines; The Ronald Press Company – New York – 1961
- [4] EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA LTDA. Reguladores de Indução de Uso Industrial – Manual de utilização – São Paulo – 1998
- [5] SAY, M.G. Alternating Current Machines; Pitman Publishing Corporation – New York – 1976

8.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Ivan E. Chabu

Nascido em São Paulo, em 1955. Engenheiro Eletricista pela Escola Politécnica da USP - EPUSP em 1978. Mestre e Doutor em Engenharia pela EPUSP em 1990 e 1997 respectivamente. Diretor técnico da Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. Professor Doutor da EPUSP, no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas – PEA.

José Roberto Cardoso

Nascido em São Paulo, em 1949. Engenheiro Eletricista pela EPUSP em 1974. Mestre e Doutor em Engenharia pela EPUSP em 1979 e 1986 respectivamente. Professor Titular da EPUSP, no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas- PEA. Coordenador do LMAG – Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado da EPUSP.