

ALTERNATIVAS PARA PARTIDAS DE GRANDES MOTORES DE INDUÇÃO EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE EMERGÊNCIA *

Elaine Cristina do Carmo¹
Marcos Fernando dos Santos²
Nocompleto do autor³
Victor Flores Mendes³
Leonardo Adolpho Silva⁴
Virna Costa Onofri⁵

Resumo

No cenário de falta de suprimento de energia elétrica numa planta siderúrgica, sistemas de geração de emergência são geralmente aplicados para suprir a energia elétrica para cargas críticas e possibilitar o reestabelecimento das unidades industriais. Esses sistemas tipicamente, possuem um conjunto motor-gerador que são dimensionados para possibilitar a partida das cargas a ele conectado, assim como sua correta operação em regime até o retorno total da energia. Baseado nesses conceitos, o presente estudo mostra as alternativas que podem ser adotadas para partir grandes motores com o sistema de emergência, de forma a permitir o correto reestabelecimento de energia elétrica para os processos industriais e também otimizar custos de manutenção, e aumentando a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: Controle V/f; Sistemas de emergência; Motores de indução trifásicos; Partida em rampa de tensão.

STARTING LARGE INDUCTION MOTORS ALTERNATIVES FOR EMERGENCY GENERATION SYSTEM

Abstract

In the scenario of a lack of electric power in a steel plant, emergency starting systems are generally applied to supply the electrical energy needed for critical loads and to enable the reestablishment of industrial units. These systems typically have a motor-generator set that is sized to withstand starting of loads and correct operation in regime until full power return. Based on these concepts, the present study presents the alternatives that can be adopted for the starting of large induction motors with the emergency system, in order to allow the correct reestablishment of energy for the industrial process and also optimize maintenance costs and improve asset utilization, increasing the reliability of the system.

Keywords: Control V/f starting; Emergency systems, Three phase induction motors, Voltage ramp starting.

¹ Engenharia Elétrica, Mestre, Engenheira, Utilidades, Gerdau, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

² Engenharia Elétrica, Mestre, Professor, Departamento Engenharia Elétrica, CEFET MG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenharia Elétrica, Doutor, Professor, Departamento Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenharia Elétrica, Doutor, Professor, Departamento Engenharia Elétrica, UFSJ, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil

⁵ Engenharia Elétrica, Mestre, Engenheira, Engenharia, Gerdau, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de “blackout” de energia elétrica para a indústria siderúrgica consiste em um cenário crítico indesejável. Quedas bruscas de energia podem comprometer a integridade dos equipamentos e segurança operacional dos processos, podendo levar a sérias perdas de ativos, assim como expor as pessoas a riscos de acidentes[1]. Para evitar esse tipo de ocorrência, tipicamente, as usinas siderúrgicas integradas possuem sistema de geração interna através do aproveitamento de gases gerados pelos próprios processos siderúrgicos através da queima desses gases em caldeiras para geração de energia elétrica, vapor de processo e envio de ar soprado para os altos fornos. Para complementar a necessidade de suprimento da carga total da planta e aumentar a flexibilidade, os sistemas de geração interna são interligados à concessionária de energia [2]. Porém existem casos extremos de situações de emergência em que há interrupção do fornecimento de energia pela concessionária e também pelo sistema de geração de energia elétrica interna, ou seja, o “blackout” geral da planta. Nessa situação, é imprescindível que o sistema elétrico seja reestabelecido o mais breve possível de forma a manter o envio dos suprimentos de utilidades vitais aos processos. Sistemas de partida em emergência são constituídos geralmente de motores diesel, acoplados a geradores de energia elétrica que, por sua vez, alimentam os motores elétricos. A corrente de partida dos motores de indução trifásicos é um dos principais problemas dos sistemas de energia elétrica, pois atingem valores de 3 a 8 vezes o valor a plena carga, sobrecarregando momentaneamente o sistema elétrico que deve estar preparado para suportá-la. Para sistemas de emergência, como os alimentados por um gerador a diesel, os altos picos de corrente de partida direta demandam grandes valores de potências elétricas, que se traduzem em demandas de potência mecânica no motor diesel de potência ativa (excitação) no gerador [2]. Além disso, essas partidas podem gerar afundamentos de tensão, que podem comprometer o funcionamento de equipamentos ligados a essa rede. A partida dos motores pode assumir várias configurações de forma a suavizar os impactos na instalação e ao gerador elétrico [4]. Nesse trabalho, são propostas e analisadas duas técnicas de partida aplicadas aos motores de uma caldeira de usina siderúrgica. A primeira, por soft-starter (controle de tensão em rampa) e a segunda por inversores de frequência (controle da relação entre a tensão e frequência). Nessas duas possibilidades a corrente de partida dos motores diminui, demandando menor potência do motor diesel e do gerador, reduzindo conseqüentemente, custos e o impacto no sistema de geração de emergência.

2 DESENVOLVIMENTO

Considerando um sistema elétrico composto por três motores de indução de diferentes potências e alimentados por um gerador síncrono acionado por motor diesel de forma isolada, serão simulados e analisados os comportamentos das principais grandezas do sistema elétrico correlacionadas com a partida simultânea dessas três máquinas. Primeiramente será utilizada a técnicas de rampa de tensão e posteriormente, rampa de tensão/frequência [5]. Esses motores são acionados por um gerador síncrono que possui como sua máquina primária o motor diesel Cummins QSK60. Os motores fazem parte do sistema principal do processo de produção de vapor, gerado na caldeira para possibilitar queima de combustíveis para

geração de vapor, possuem originalmente partida direta e estão conectados no mesmo barramento. As alternativas estudadas são detalhadas a seguir:

2.1 Partida simultânea dos três motores com rampa de tensão

As simulações iniciais foram feitas considerando apenas a rampa de tensão com o sistema com frequência nominal e com todas as cargas sendo acionadas simultaneamente. Nesse caso como a máquina síncrona primária estará conectada de forma isolada ao sistema, a rampa só será possível acionando num mesmo instante os três motores de indução. Serão apresentados os comportamentos dos principais parâmetros do sistema elétrico, assim como a suportabilidade da máquina síncrona acionada por motor diesel, que será simulado como uma fonte de tensão. A técnica é a mesma utilizada em *soft-starters* em que se aplica uma rampa de tensão durante um período de tempo determinado para a partida de grandes motores[6]. A figura 1 mostra uma rampa típica de uma *soft-starter*, com os parâmetros configuráveis: valor de tensão inicial, tempo de rampa, tensão final.

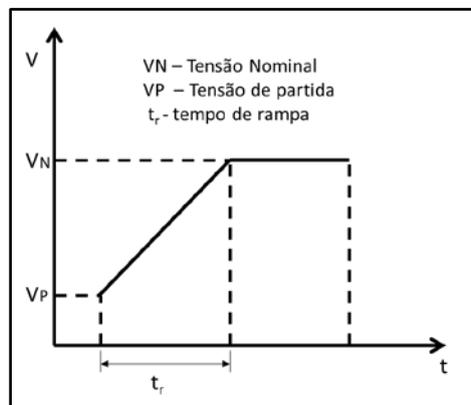


Figura 1.Exemplo de rampa de tensão com parâmetros configuráveis em uma soft-starter.

Existe uma tensão mínima necessária (tensão inicial) que deve ser aplicada aos motores para possibilitar sua partida[7], já que com a redução de tensão, os motores de indução perdem sua capacidade de conjugado, conforme pode ser visto na figura 2.

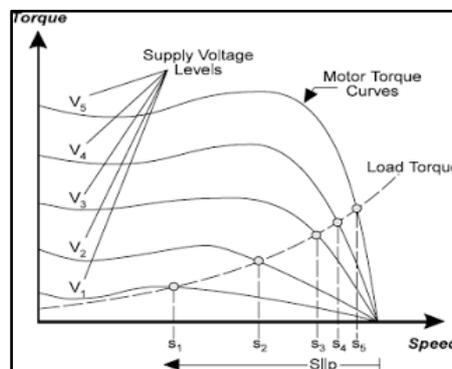


Figura 2. Efeito da redução da tensão de alimentação na curva conjugado x velocidade dos motores de indução.

2.2 Partida com rampa de tensão e frequência

As simulações nesse cenário foram feitas considerando a partida sequencial dos três motores com valores pré-definidos de tensão e frequência, inferiores aos valores nominais, mas com a mesma relação V/Hz. A frequência inicial foi escolhida de modo a coincidir com a velocidade de marcha lenta do motor diesel. Após a estabilização na velocidade correspondente dos três motores, após a partida sequencial, é aplicada a rampa de tensão e frequência até o atingimento final da velocidade dos três motores, ou seja, o final da partida completa.

O princípio a ser utilizado nessa alternativa será o mesmo aplicado nos inversores de frequência, que para controlar a velocidade dos motores de indução variam na mesma proporção os valores de frequência e tensão aplicados aos terminais da máquina conforme pode ser visto na figura 3.

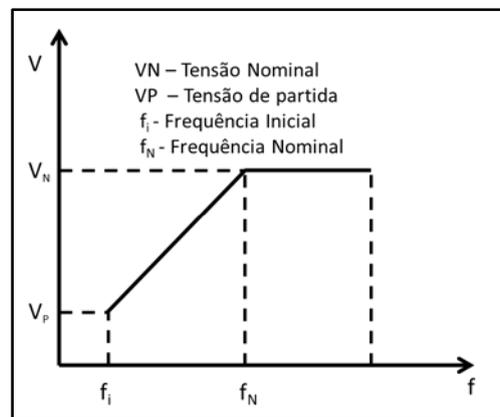


Figura 3. Exemplo de rampa de tensão e frequência (controle V/f)

Uma das grandes vantagens dessa técnica, é o fato de que o motor de indução é capaz de entregar seu conjugado nominal numa ampla faixa de velocidades. Esse fato se dá por se manter o fluxo magnético aproximadamente constante na máquina, o que traz ganhos em eficiência energética e também na redução da duração das altas correntes de partida para motores com momentos de inércia grandes. Além disso, partes mecânicas sofrem menores danos com o passar do tempo devido à suavidade da aceleração da máquina.

O efeito no conjugado do motor de indução para diferentes valores de frequência com relação V/f constante foram simulados e estão representados na figura 4:

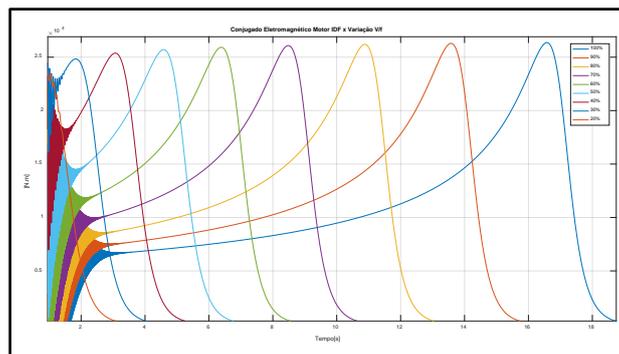


Figura 4. Comportamento da característica conjugado x velocidade para diversos níveis de V/f.

Para reduzir a corrente de partida dos motores de indução, existem diversas técnicas que utilizam dispositivos que diminuem a tensão de alimentação do estator durante a partida [8]. Dentre essas técnicas, pode-se citar: partida com chave estrela-triângulo, partida com chave compensadora (autotransformador), soft-starter, partida com resistência intercalada e partida com indutância intercalada.

A figura 5 mostra, de forma simplificada, o sistema elétrico considerado nesse trabalho para fins de simulação.

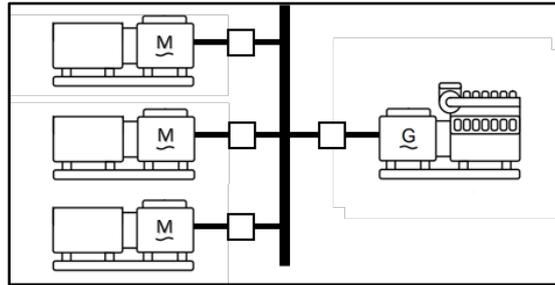


Figura 4. Sistema de emergência acionado por gerador a diesel

No projeto original, de forma a viabilizar a partida dos motores para o processo, os mesmos possuem inversores de frequência que suavizam a partida sem sobrecarregar o sistema de emergência. Além disso, em operação normal, há possibilidade de redução do consumo de energia elétrica. Se não fosse projetada a partida com os inversores de frequência, seriam necessárias muitas unidades geradoras para fornecer a potência suficiente para a partida direta das máquinas. Dependendo da potência dos motores, essa solução se torna inviável. O problema acontece quando esses equipamentos ou até mesmo a caldeira que possui os inversores se encontram fora de operação por algum defeito ou necessidade de manutenção, ficando indisponíveis e fazendo com que o sistema de emergência fique inoperante, impossibilitando a partida das máquinas de forma direta.

Baseado no mesmo conceito das soft-starters e dos inversores de frequência, considerando a possibilidade de executar os ajustes nos controles da máquina síncrona para as rampas de tensão e atuando no controlador de velocidade do motor diesel para ajustar a frequência do sistema [9], foram simulados vários cenários onde foram verificadas a viabilidade e limitações de cada um.

Serão considerados os seguintes valores limites de corrente e potências para o gerador (conforme dados de placa):

- Gerador operando em regime stand-by*
- $I_{m\acute{a}x} = 347 \times 2 = 694A$ em 20 segundos
- $P_n = 2500 \times 0.8 = 2.000$ kW
- $Q_n = 1500$ kVAr

*Stand-by: Definido como o regime de operação do motor diesel que considera a máxima utilização de sua potência nominal durante um tempo determinado.

Dados de estabilidade, curva conjugado versus velocidade do motor diesel e curva de capacidade do gerador não foram considerados nesse estudo. O software utilizado para as simulações foi o MATLAB/SIMULINK.

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A. Partida simultânea com rampa de tensão

Para a condição de rampa de tensão com os três motores partindo simultaneamente, foram feitas simulados vários tempos de rampa, com tensão inicial de 50% da tensão nominal. Os valores máximos de corrente observados são apresentados na Tabela I.

Tabela 1. Resultados das simulações de rampa de tensão.

Tempo de Rampa [s]	Imáx [A]	ΔT [%]	ΔI [%]	Pmáx [MW]	Qmáx [MVar]	Imáx [A]
60	1003	-	-	2,9	5,7	1003
120	958	200	-4,7	2,9	4,3	958
240	904	400	-10,9	2,4	3,9	904
360	855	600	-17,3	2,2	3,5	855
480	830	800	-20,8	2,1	3,4	830

Observa-se que em todas as simulações, as correntes máximas ficaram acima do limite considerado para o gerador (694A). Grandes variações no tempo da rampa de tensão a partir de certo ponto, acarretam pequenas variações do valor máximo da corrente exigida do sistema [10]. Os valores das potências também atingem valores bem elevados, principalmente de potência reativa. Mesmo com a rampa de 480 segundos, considerado o limite de tempo máximo aceitável para uma partida no sistema de emergência dada a urgência da aplicação, os limites de capacidade do gerador são ultrapassados, conforme pode ser visto nas figuras 6 e 7.

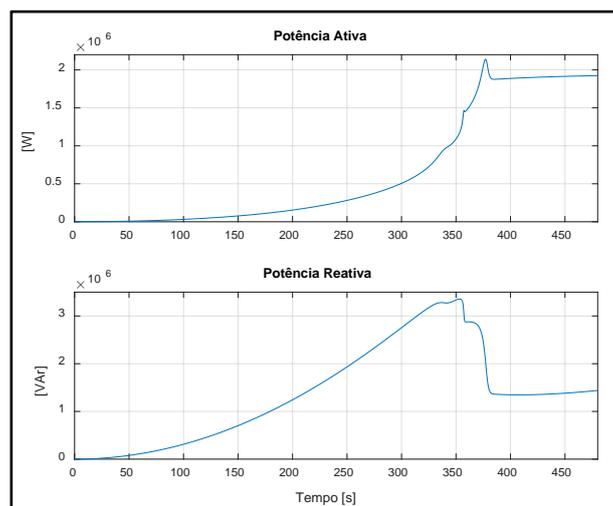


Figura 6. Potência ativa e reativa demandadas do sistema elétrico durante a partida dos três motores com rampa de tensão com duração de 8 minutos.

A figura 6 mostra a evolução no tempo das potências ativa e reativa considerando a rampa de tensão com duração de 8 minutos e a figura 7 mostra o período em que a corrente no barramento superou o limite considerado para o gerador.

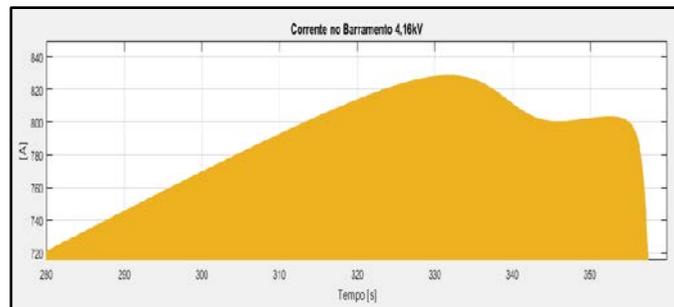


Figura 7. Valores máximos de corrente com 8 minutos de rampa de tensão

Observa-se na figura 7 que, mesmo com 8 minutos de partida, a corrente total do sistema permanece acima de 700A durante 70 segundos. Para compensar a partida de motores com elevados momentos de inércia é necessário estender o tempo de rampa [11]. Porém se o tempo de partida se estende muito, o sistema de emergência que deve ser acionado e ter resposta rápida passa a ficar inviável, devido ao tempo em que os equipamentos levarão para estarem disponíveis para serem utilizados nos processos.

Considerando, como visto, que as soft-starters apresentam tipicamente problemas para partir motores com elevados momentos de inércia[12], foi realizado um cenário de partida sem o maior motor que aciona a carga de maior momento de inércia ($J = 2019 \text{ kgm}^2$).

A figura 8 mostra os valores de tensão e corrente para esse cenário.

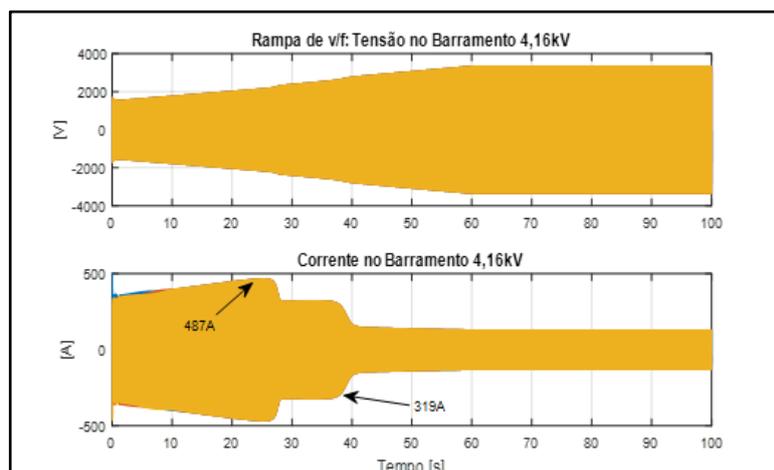


Figura 8. Valores de tensão e corrente no sistema simulado desconsiderando o maior motor

Retirando o motor que aciona a carga com maior momento de inércia, vemos que a corrente do sistema diminuiu consideravelmente, para um valor máximo de 487A, nesse caso dentro dos limites do gerador síncrono.

Os valores das potências ativa e reativa, para esse caso são apresentados na figura 9. Observa-se que a potência reativa ainda ultrapassa o valor considerado

limite para o gerador.

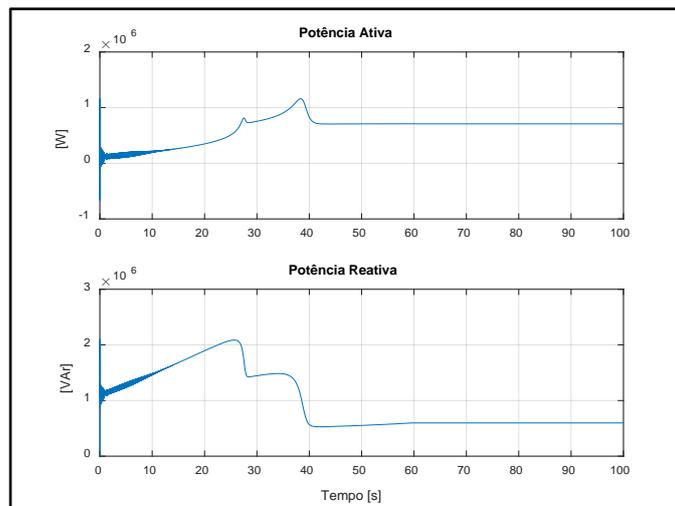


Figura 9. Potências ativa e reativa para a partida simultânea dos motores menores

B. Partida simultânea com rampa de tensão e frequência

A simulação realizada considerou uma fonte com tensão e frequência fixas, de respectivamente 1733V e 25Hz, durante os 20 segundos iniciais. O motivo da escolha desse valor de frequência é que corresponde a velocidade em marcha lenta do motor diesel (750rpm). A tensão escolhida corresponde à mesma relação com a tensão nominal assim como a frequência (aproximadamente 42% da nominal), pois além de depender da rotação, há a possibilidade de ajustar o valor da tensão pelo controlador da excitatriz do gerador [13].

Após o chaveamento individual e a estabilização da rotação dos três motores sendo chaveados sequencialmente, dar-se início a rampa de V/f com duração de 80 segundos.

A figura 10 mostra as rampas de tensão e frequência simuladas para esse cenário:

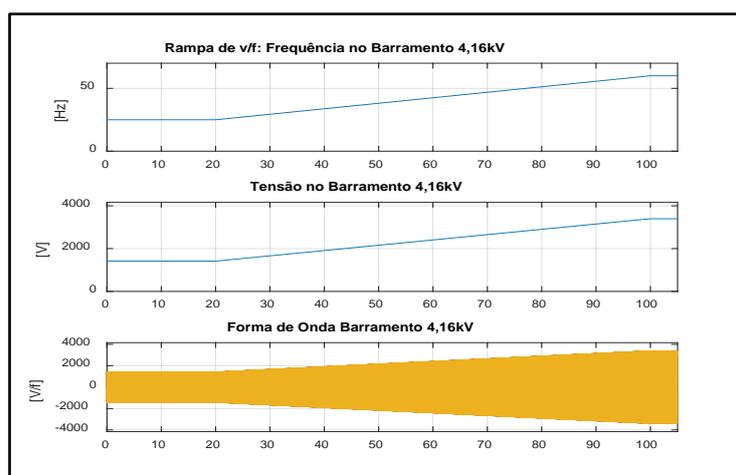


Figura 10. Formas de onda para a simulação da rampa de tensão e frequência para a alternativa 2

A figura 11 mostra o comportamento das tensões e correntes nos terminais do gerador durante todo o processo de partida.

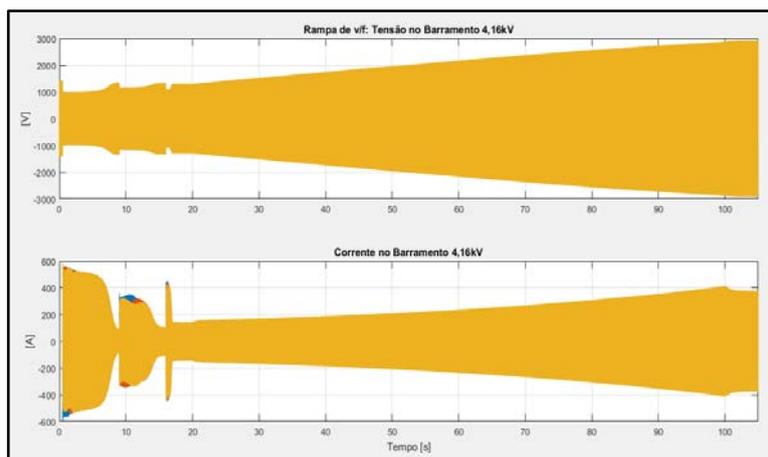


Figura 11. Partida dos motores na rampa V/f

Durante os primeiros 20 segundos, é realizada a partida sequencial dos motores, daquele com maior momento de inércia até o com menor, com tensão e frequência fixas. O comportamento da tensão e corrente nos terminais do gerador durante esse período é melhor detalhado na figura 12. É durante esse período que os maiores valores de corrente são atingidos.

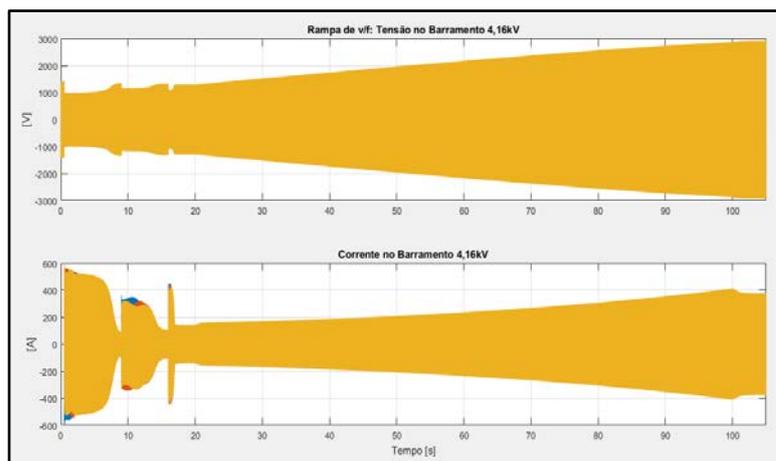


Figura 11. Partida dos motores na rampa V/f

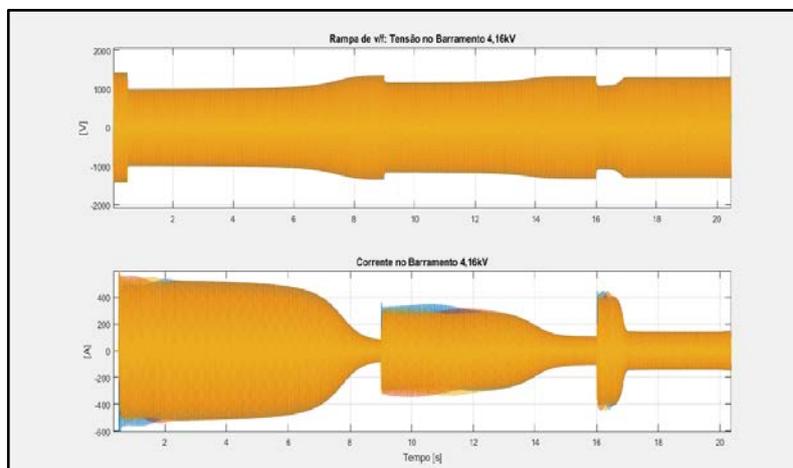


Figura 12. Correntes e quedas de tensão durante a inserção dos motores na rede elétrica

A corrente máxima registrada durante a partida do maior motor foi de 530A durante 8 segundos. Para o segundo motor foi de 320A durante 5 segundos, e, para o último, de 420A durante 1 segundo. Notavelmente a cada partida de motor ocorreu uma significativa queda de tensão, devido a impedância da máquina síncrona. Na partida do maior motor, a queda de tensão chegou a 30%. A queda de tensão em regime permanente foi de 16%, devido à não implementação no modelo de simulação da ação do regulador de tensão que age sobre a excitatriz do gerador.

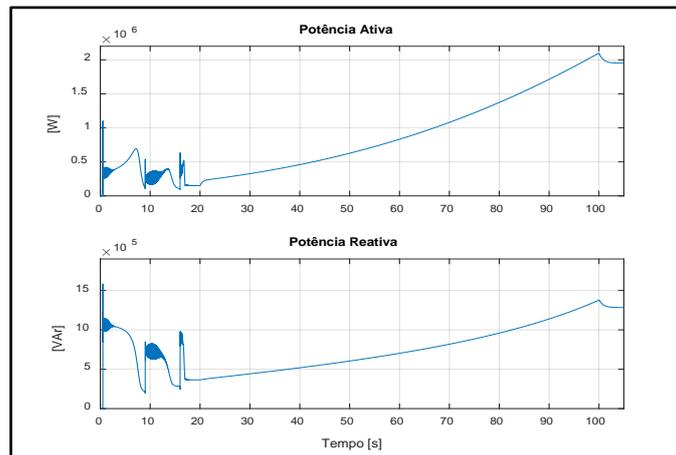


Figura 13. Comportamento das potências ativas e reativas durante rampa V/f

A potências máximas simuladas atingiram o patamar de 2,1MW e 1,38MVar exatamente no final da rampa, quando os motores atingem a velocidade nominal. Para esse cenário a potência aparente que deverá ser entregue pela rede será de 2,51MVA. Provavelmente, a ação da regulação de tensão do gerador irá alterar esses valores.

3 CONCLUSÃO

Para a condição de rampa de tensão com a partida simultânea dos três motores, observou-se que o gerador será muito demandado em relação a correntes e potências ativas e reativas, tendo seus limites ultrapassados. Porém, quando foi retirado do sistema o maior motor (motor 1) que possui o maior momento de inércia e carga para acionamento verificou-se a possibilidade de partir os outros dois motores sem ultrapassar os limites de capacidade do gerador. Nesse caso, para a partida completa do processo, será necessário que o maior motor tenha inversor de frequência dedicado.

As simulações de partida e aceleração dos motores com rampa de V/f, considerando que o motor diesel em sua velocidade de marcha lenta tenha conjugado suficiente para manter a rotação do gerador e que o mesmo tenha capacidade de operar momentaneamente com um fator de potência baixo (em torno de 0,2 na partida dos motores estudados), mostram que essa é uma solução promissora para o caso em estudo e merece a continuidade das investigações. Os próximos passos desse trabalho serão o estudo e a modelagem do sistema de regulação de tensão e excitação do gerador síncrono e do sistema de controle de rotação do motor diesel (controlador de velocidade), assim como a dinâmica mecânica do grupo motor-gerador.

REFERÊNCIAS

- 1 BEEMAN, Donald. "Industrial Power Systems Handbook". Nova York: Mcgraw-Hill, 1955. 971 p. General Eletric Company.
- 2 IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. IEEE Std 141-1993.
- 3 WIGINGTON, Adam. "A comparison of induction motor starting methods being powered by a diesel-generator" set. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Nebraska, Lincoln, 2010..
- 4 CHAPMAN, Stephen J.. "Fundamentos de máquinas elétricas". 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013. 684 p.
- 5 BARNES, Malcolm. "Practical Variable Speed Drives and Power Electronics". GreatBritain: Elsevier, 2003.
- 6 KOSOW, Irving Lionel. "Máquinas Elétricas e Transformadores". 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1982. Tradução de Felipe Luz Ribeiro Daiello e Percy Antônio Pinto Soares.
- 7 FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., Charles; UMANS, Stephen D. "Máquinas Elétricas: com Introdução a Eletrônica de Potência". 6. ed. Rio de Janeiro: Bookman, 2006. 657 p.
- 8 MELLO, F.p. "Dinâmica das Máquinas Elétricas I". Santa Maria: Centrais Elétricas Brasileiras S.a - Eletrobrás, 1979. 235 p. Tradução de Arlindo R. Mayer e SomchaiAnsuji.
- 9 DEIF S/A, Automatic Genset Controller AGC-4: "Designer's Reference Handbook". 2017. Disponível em: <www.deif.com>. Acesso em: 29 jul. 2017.
- 10 TORO, V. Del, MARTINS, O. A. "Fundamentos de Máquinas Elétricas", LTC, 1999.
- 11 WILLIAMS A. Jack, GRIFFITH M. Shan. "Evaluating the Effects of Motor Starting on Industrial and Commercial Power Systems", Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.IA-14, no.4, pp.292-305, July 1978.
- 12 KIRAR MukeshKumar, AGNIHOTRI Ganga. "Emergency Generator Sizing and Motor Starting Analysis". World Academy of Science, Engineering and Technology International. Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:7, No:1, 2013
- 13 MARCHON, Roberta Mateus Antunes dos Santos. "Desempenho Dinâmico de Sistemas Industriais Frente a Modelagem dos Motores de Indução". 246 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.