

Estimação de Velocidade de Motores de Indução Trifásicos Através do Sinal de Corrente no Domínio do Tempo

F. Q. D'Almeida, A.C. de C. Lima

Departamento de Engenharia Elétrica – Escola Politécnica – UFBA

R. Aristides Novis 2, CEP 40210-630 – Salvador – Bahia - Brasil

E-mails: fqd@terra.com.br, acdcl@ufba.br

Abstract

This article presents the employment of Neural Networks to estimate the speed of an induction motor from its line current in the time domain. There are techniques capable to extract this information from the signal frequency spectrum, however to transform the signal to the frequency domain a very high computational effort is required. The basic purpose of using the signal time representation is to avoid the extra computational cost while trying to maintain the same result precision.

1. Introdução

Há muito anos os motores de indução trifásicos (MIT) vêm sendo utilizados nas mais diversas aplicações, principalmente àquelas associadas à indústria. Os MITs têm seu princípio de funcionamento centrado na indução de correntes elétricas no rotor, proporcionando o surgimento de uma força eletromagnética capaz de realizar trabalho mecânico. Sendo assim, existe uma forte interação eletromagnética entre o rotor e o estator, de tal forma que monitorando apenas as correntes que circulam pelo estator é possível determinar alguns parâmetros relativos ao rotor da máquina.

Trabalhos como o de Blasco *et al* [1], Beguenane *et al* [2] e Hurst e Habetler [3], demonstram que é possível se determinar o escorregamento e a velocidade do rotor de MIT através da análise do espectro de frequências da corrente de alimentação. Contudo, a obtenção do espectro de frequências desta corrente demanda um custo computacional extra muito grande na realização da transformada rápida de Fourier (FFT).

Neste trabalho é apresentado um experimento onde se faz uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs) para se determinar a velocidade do rotor a partir do sinal da corrente de linha no domínio do tempo, dispensando a necessidade da transformação do sinal no tempo para o espectro de frequências. Partiu-se do princípio que, a informação que torna possível a determinação do escorregamento através da análise do espectro de frequências é contida no sinal no domínio do tempo, mesmo que esta não esteja apresentada de forma explícita.

A importância da determinação da velocidade do rotor pela análise da corrente de alimentação, e não diretamente (através de tacômetros, por exemplo), está em situações onde o motor se encontra em local de difícil acesso ou de condições extremamente adversas.

2. Materiais e Métodos

2.1. Equipamentos e Programas

A bancada de ensaio utilizada neste trabalho foi constituída de um motor de indução trifásico acoplado a um gerador DC com carga variável simulando freio magnético, um microcomputador padrão PC e uma placa de aquisição de dados para a monitorização do sinal de corrente, além de um circuito para condicionamento. Suas especificações técnicas são:

- Motor de indução trifásico WEG, 2 CV, 2 pares de pólos;
- Gerador DC, BKB, 5 kW;
- Carga resistiva variável;
- Computador Intel Pentium 200MHz, 32 Mb RAM, HD 2Gb;
- Placa de aquisição de dados Advantech PCL812-PG; 16 canais de entrada analógicas, conversor A/D 12 bits, frequência de amostragem máxima 30KHz no modo DMA, precisão $0,015\% \pm 1$ bit.
- Circuito de condicionamento com sensor de corrente por efeito Hall tipo LEM LA-25; amplitude de saída ± 5 V e banda de passagem 0-1400 Hz.

Os programas utilizados foram:

- Microsoft Windows 95 OSR2;
- MATLAB versão 4.2c;
- MATLAB Neural Network Toolbox versão 2.0.3;
- Rotina desenvolvida no DEE/UFBA, neste laboratório, para cálculo da velocidade do rotor pela análise do espectro de frequências da corrente.

2.2. Aquisição dos Sinais de Corrente de Linha

A primeira etapa no desenvolvimento do trabalho está relacionada com a aquisição de uma larga base de dados para posteriormente ser apresentada à RNA. O esquema mostrado na Fig. 1 representa a bancada de ensaio empregada no experimento, onde vários conjuntos de amostras de sinais de correntes de alimentação, para diferentes situações de carregamento, foram adquiridas.

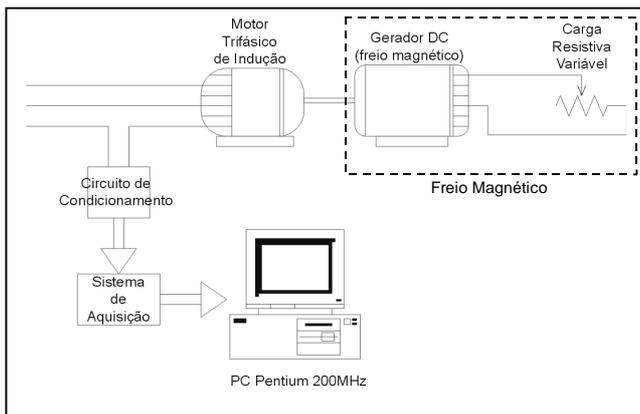


Figura 1 : Bancada para coleta de dados

O sinal de corrente de uma das fases do motor é acondicionado para uma frequência máxima de 1400 Hz e amplitude máxima de ± 5 V de modo que este esteja dentro dos padrões aceitáveis pela placa de aquisição. As coletas do sinal foram feitas com taxa de amostragem de 8,3 kHz, sendo cada coleta constituída de trinta mil pontos. Estes valores de taxa de amostragem e de comprimento das coletas foram escolhidos para permitir a compatibilidade destas coletas com as rotinas desenvolvidas por Santana *et al* [4] que calculam a velocidade do rotor através do espectro de frequências da corrente.

2.3. Tratamento dos Sinais de Corrente de Linha

Os conjuntos de amostras coletados foram separados em dois grupos: o primeiro com 61 coletas foi utilizado como conjunto de treinamento da RNA, o segundo com 26 coletas foi utilizado como conjunto de teste. Calculou-se então a velocidade do rotor referente a cada uma das coletas (dos dois conjuntos) utilizando-se o software de análise do espectro de frequências desenvolvido anteriormente neste laboratório [4]. Estes valores de velocidade foram utilizados como saídas esperadas da rede durante seu treinamento e como comparativos dos resultados da rede no conjunto de teste.

As coletas nas suas formas originais não são úteis como entrada para a rede, pois são compostas de aproximadamente 216 ciclos completos de corrente, contendo assim muita informação redundante. Além disso, as coletas não se encontram em sincronismo, ou

seja, cada uma delas é iniciada em instantes diferentes do ciclo de corrente. O sincronismo das entradas é imprescindível, pois se deseja que a rede reconheça a forma de onda de corrente e associe-a a um valor de velocidade do rotor. Na falta de sincronismo, duas entradas associadas a uma mesma velocidade podem ter padrões completamente distintos. Note-se também que, como se deseja que a rede seja capaz de reconhecer a forma de onda de corrente, deve-se normalizar o valor de pico de todos os sinais adquiridos de modo que sejam iguais entre si. Isto faz-se necessário para evitar que a rede tente reconhecer a velocidade do rotor a partir do valor de pico da corrente de alimentação, uma vez que a variação da velocidade do rotor leva a uma variação da potência consumida pelo motor, tendo como consequência uma variação do valor de pico da corrente.

Um detector de zero, implementado via software, foi utilizado para extrair de cada coleta aqueles semiciclos positivos de corrente que iniciavam-se em sincronia com a amostragem. Foram extraídos 878 semiciclos das coletas do conjunto de treinamento e 374 semiciclos das coletas do conjunto de teste. O número de semiciclos extraídos de cada coleta não é constante, uma vez que cada coleta foi iniciada em um instante diferente do ciclo de corrente e possui um número diferente de semiciclos positivos sincronizados com a amostragem. Cada semiciclo é composto por 70 amostras de corrente (período de um semiciclo / tempo entre amostras $\cong 70$) e foi posteriormente normalizado de modo a ter amplitude de pico igual à unidade. Estes semiciclos sincronizados e normalizados serão utilizados como entrada para a RNA.

2.4. Definição da Topologia

Uma RNA do tipo Multicamadas (MLP) foi proposta para a estimação de velocidade de rotores dos MITs. A rede, constituída de duas camadas, recebe nos seus 70 neurônios de entrada um sinal composto por 70 valores referentes à intensidade de corrente compondo um semiciclo de corrente. A camada de saída, com apenas um neurônio, totaliza as informações da camada anterior e expressa o valor da velocidade associada à forma de onda apresentada na entrada. Como os valores de velocidade do rotor variam neste experimento entre 1740 e 1800 rpm, utilizou-se a função de ativação linear, uma vez que esta não produz respostas limitadas a uma certa faixa de valores.

2.5. Treinamento da RNA

Após definida a topologia da RNA, e já tendo preparado as entradas e saídas dos conjuntos de treinamento, utilizou-se, no aprendizado da rede, a técnica do mínimo erro quadrático, onde minimiza-se o somatório dos quadrados dos erros entre as saídas esperadas e as saídas geradas pela rede.

Após concluído o treinamento, verificou-se o desempenho da rede quando lhe eram fornecidas como entradas os elementos usados no conjunto de treinamento. Este teste visa apenas verificar se a RNA é capaz de absorver as informações contidas no conjunto de treinamento satisfatoriamente. A Fig. 2 apresenta as respostas esperadas e as respostas fornecidas pela rede. Pode-se verificar que a RNA fornece respostas bastante próximas às esperadas.

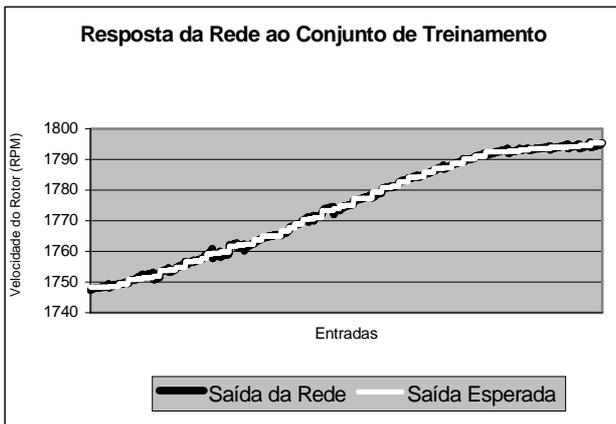


Figura 2 : Resposta da rede ao conjunto de treinamento

Para uma melhor análise do desempenho da rede está representado na Fig. 3 o erro relativo entre o valor esperado e a saída da rede.

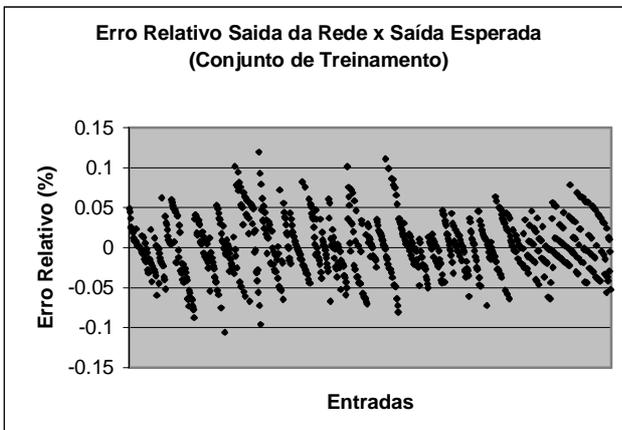


Figura 3 : Erro relativo no conjunto de treinamento

Pode-se verificar que os erros relativos não excedem 0,15%, o que é um resultado excelente e confirma que o treinamento foi concluído com sucesso

2.6. Teste da RNA

Para validar a rede obtida após o treinamento submeteu-se a mesma ao conjunto de teste composto pelas entradas (semiciclos de corrente) que ainda não lhe foram apresentadas. Se para este conjunto a resposta da rede for satisfatoriamente próxima da resposta correta esperada pode-se afirmar que a rede

conseguiu generalizar as informações que lhe foram apresentadas durante o treinamento.

A Fig. 4 apresenta as respostas da rede ao conjunto de teste, bem como as respostas esperadas.

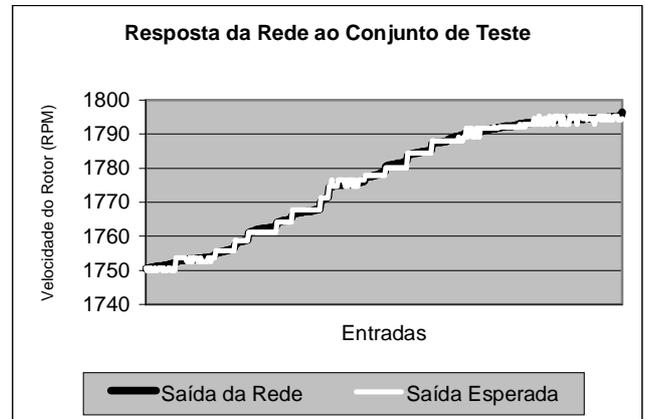


Figura 4 : Resposta da rede ao conjunto de teste

Os erros relativos são mostrados de forma gráfica na Fig. 5, para facilitar a análise de desempenho da rede quando esta é submetida ao conjunto de teste.

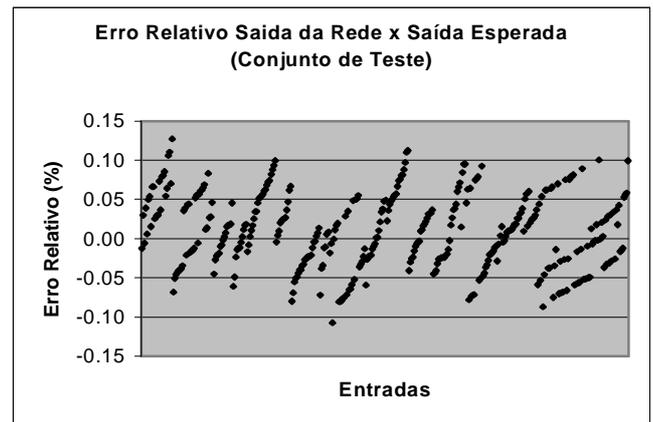


Figura 5 : Erro relativo no conjunto de teste

Pode-se observar que novamente os valores de erro relativo não excedem 0,15% confirmando a validade da rede.

3. Comparação da estimação em frequência e no domínio do tempo

A estimação da velocidade através da representação temporal do sinal certamente é um pouco mais vulnerável a ruídos de leitura que a estimação pelo espectro de frequências. Supondo a existência de ruído branco no sinal lido, este praticamente não causa perturbações na detecção das frequências onde ocorrem os picos de intensidade, já que o ruído branco possui a mesma intensidade para todas as componentes de frequência (teórico). Assim, a estimação em frequência é muito pouco sensível a este tipo de ruído. A

representação temporal do sinal sofre perturbações muito mais significativas, uma vez que o ruído branco é aleatório no tempo. Contudo, desde que os níveis de ruído sejam suficientemente pequenos para não causar distorções na forma da onda (note que esta não é uma restrição muito forte), o método apresenta resultados extremamente satisfatórios. Além disto, como a estimação da velocidade no domínio do tempo pode ser feita a uma taxa muito alta (especialmente se comparada ao método da análise em frequência), pode-se realizar estimações redundantes para certificar que erros aleatórios não tenham interferido no valor estimado. Observe que, mesmo realizando estas estimações redundantes, o esforço computacional aplicado para a estimação no tempo continua muito inferior à análise na frequência.

A determinação da velocidade do rotor para situações de transitório ainda não foi implementada. Contudo, para estes casos, a análise no tempo mostra certas vantagens. Note que o aparecimento dos picos no espectro da corrente do motor está associado a existência de ranhuras no estator onde são posicionados os enrolamentos. Estas ranhuras fazem com que, durante o giro do rotor, a relutância magnética do equipamento varie, causando assim uma perturbação na corrente de alimentação. A frequência desta variação é função da velocidade de rotação e do número de ranhuras existentes. Como o número de ranhuras é uma característica construtiva do equipamento, a frequência da variação da relutância, e conseqüentemente a frequência da perturbação na corrente, depende apenas da velocidade de rotação. Em situações de transitório, a velocidade de rotação não é constante; logo a frequência da perturbação na corrente também varia. Deste modo, a determinação da velocidade do rotor via análise espectral só é possível se, durante a aquisição do sinal, a variação da velocidade do rotor não for significativa. Como para uma boa estimativa de velocidade é necessária uma boa resolução espectral (resolução espectral = frequência de amostragem / número de amostras), torna-se necessária uma grande quantidade de amostras, o que não permite a diminuição do tempo de coleta (tempo da coleta = número de amostras * período de amostragem). O aumento da frequência de amostragem não produz efeito sobre a diminuição do tempo de coleta, já que para a manutenção da resolução espectral tem-se que aumentar, na mesma proporção, o número de amostras. Assim, para uma dada resolução espectral, o tempo de coleta é invariável (para bons resultados é necessário um tempo superior a 2s). Desta forma, a estimação da velocidade via espectro de frequências tem sua precisão limitada ao tempo de coleta que pode ser utilizado, e este é limitado pela aceleração máxima do rotor. Logo, para aplicações onde podem ocorrer alterações bruscas de velocidade, a estimação pela análise espectral pode não ser viável. Este tipo de limitação não ocorre na análise temporal uma vez que se utiliza apenas um

semiciclo da corrente, cuja duração de 8,3 ms é muito pequena para que haja alterações significativas na velocidade no motor.

A principal vantagem da abordagem temporal para a estimação da velocidade de MITs é a grande diminuição do esforço computacional necessário. Para a obtenção do espectro de frequências é necessária a realização da FFT de um sinal com alguns milhares de amostras (para boa resolução espectral, cerca de 10.000 com frequência de amostragem mínima de 3 kHz) o que cria a necessidade de milhares de somas e multiplicações complexas (cerca de 70.000 multiplicações e 140.000 somas complexas), enquanto que a abordagem temporal exige apenas 70 multiplicações e 140 somas reais.

4. Conclusões

Como esperado, comprovou-se que é possível estimar a velocidade do rotor de um motor trifásico de indução a partir do sinal da corrente de linha na sua forma temporal. Obviamente, na representação deste sinal no domínio da frequência, esta informação apresenta-se de maneira mais explícita e já conhecida. Contudo, com a aplicação de Redes Neurais Artificiais foi possível associar a velocidade do rotor com a forma de onda do sinal de corrente, evitando-se assim o enorme custo computacional extra relacionado à transformação da representação do sinal. Percebeu-se ainda que a utilização da representação temporal da corrente é uma alternativa superior para a estimação da velocidade durante transitórios.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio financeiro do CNPq.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Blasco, M. Summer and G. M. Asher, "Speed measurement of inverter fed induction motors using the FFT and the rotor slot harmonics", in Proc. 5th Int. Conf. Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994, pp. 90-95.
- [2] R. Beguenane, C. Ghyselen and H. Schoorens, "A proposed induction motor speed sensor without contact from slot harmonics", in Proc. 5th Int. Conf. Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994, pp. 470-475.
- [3] K. Hurst and T. G. Habetler, "A Comparison of Spectrum Estimation Techniques for Sensorless Speed Detection in Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 4, pp. 898-905, July/August 1997.

[4] A. M. Santana, A. C. C. Lima, A. E. Aguiar, "Estimação da velocidade de motores de indução trifásicos", Revista Eletricidade Moderna, pp. 158-166, Março 2000.

[5] S. Haykin, Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Prentice Hall, 1994.