

Medição de oscilação instantânea de torque, torque transiente e características de máquinas elétricas

Autor

Mitch Marks
HBM Business Development Manager eDrive Testing

HBM Test & Measurement



Medição de oscilação instantânea de torque, torque transiente e características de máquinas elétricas

As medições de potência mecânica de uma máquina elétrica são muito importantes para ajudar a entender o que o motor está fazendo em qualquer momento e ponto de operação. Medições mecânicas ajudam a caracterizar o motor, construir modelos para a máquina, garantir a confiança nos controladores e entender os limites do sistema. A medição de torque com alta precisão, largura de banda e resolução é particularmente importante para projetar um controlador e implementar uma solução de motor elétrico. Em máquinas elétricas, muitas vezes queremos entender a eficiência e a dinâmica. Como o torque não é um valor estático, é preferível ter uma medição média altamente precisa. Isto é comparável ao uso de valores RMS para eficiência elétrica. A precisão do torque é de grande importância, pois as máquinas elétricas podem operar na alta porcentagem de eficiência de 90%. Se uma máquina tem uma medição eficiente de 98% com um erro de $\pm 3\%$, isso significa que pode ter uma eficiência de 101%, o que é impossível. Portanto, uma medição de torque altamente precisa é necessária. Esta é uma questão relativamente nova, já que a eficiência do motor de combustão interna é muito menor.

Uma medição de torque de alta largura de banda também é necessária para entender o que acontece instantaneamente. Isto pode ser:

- Torque de relutância para operação em estado estacionário
- Resposta de torque durante o carregamento
- Torque durante mudanças de controle

1. Torque instantâneo e médio

A figura 1 mostra o torque durante uma medição de eficiência para um inversor PWM padrão em um cenário de torque e velocidade em estado estacionário. A seção inferior tem uma única tensão e corrente para mostrar o que está acontecendo nos terminais do motor. No topo, uma forma de onda vermelha mostra o torque instantâneo que pode ser usado para obter um valor de potência, entretanto, normalmente o que é desejado destes casos de eficiência é um bom torque médio que é na mesma base de tempo usada para os valores elétricos, de preferência em uma base por ciclo, o que significa que cada ponto medido a partir do transdutor de torque é somado e calculado ao longo do período de tempo de uma frequência fundamental de corrente. Este valor é mostrado na forma de onda preta. Isto fornece uma eficiência precisa e alinhada ao tempo entre os valores elétricos e mecânicos, sem que imprecisões sejam introduzidas a partir das flutuações naturais do sistema ou flutuações externas de um dinamômetro.

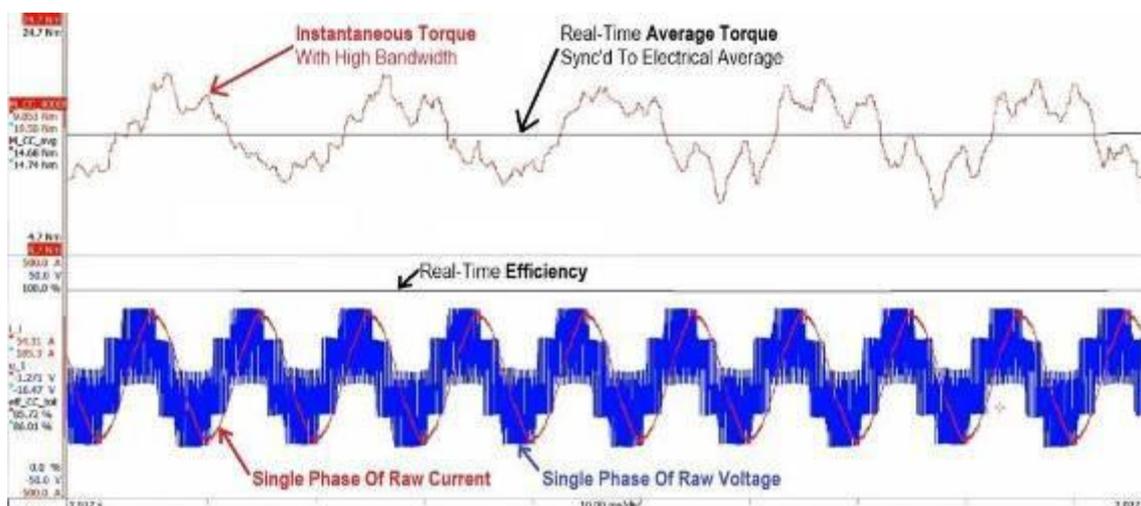


Fig. 1: Torque instantâneo e médio em tempo real para uma medição de eficiência

O uso de um sistema de aquisição de dados que registra dados a uma taxa suficiente para visualizar a largura de banda total de 6 kHz do sensor de torque permite obter médias precisas muito rapidamente. Sistemas de aquisição de dados que fazem amostragem em uma taxa mais lenta exigirão médias longas para alcançar o mesmo resultado, geralmente na ordem de minutos. O transdutor de torque de alta largura de banda e precisão acoplado a um DAQ de alta taxa de amostragem com média de contagem de ciclos em tempo real permite obter medições de torque precisas dinâmicas e médias rapidamente.

2. Teste de carga dinâmica

A figura 2 mostra o torque para um teste altamente dinâmico de um motor a 5000 rpm, inicialmente a 0 Nm, seguido por um estágio de carga de até 70 Nm. As características elétricas respondem muito rapidamente. O sinal vermelho é um torque de alta largura de banda, o sinal azul é um torque filtrado de 10 Hz frequentemente encontrado com transdutor de torque típico e o sinal preto é um torque médio de alta largura de banda em tempo real somado e calculado sobre o mesmo período de tempo frequência fundamental da corrente. O torque dinâmico em vermelho mostra claramente um pico dramático de até 105 Nm, seguido por um vale até 35 Nm. Para escolher a faixa nominal correta do torque dinâmico, o transdutor de torque deve ser considerado. Dependendo da característica da máquina elétrica, o pico de torque pode ser estimado em 2 a 3 vezes o torque na velocidade nominal de tais máquinas. O controlador do motor está reagindo ao passo de carga e possui algum tempo de acomodação de controle e amortecimento mecânico. No total, demora cerca de 1/10 de segundo para o sistema se acomodar. Mais importante, o torque é cerca de 50% maior que a média. Esta informação é muito valiosa ao determinar o que realmente está acontecendo no motor. Relacionando com carros elétricos, é exatamente isto o que o passageiro está sentindo enquanto dirige. Sabendo o que o torque está realmente fazendo, melhorias podem ser feitas para controlá-lo muito melhor. Além disso, mais tarde, há uma oscilação real no torque que tem uma natureza cíclica. Isto é chamado de ripple ou oscilação de torque e a presença de um transdutor de torque com alta largura de banda e alta precisão torna a visualização possível.

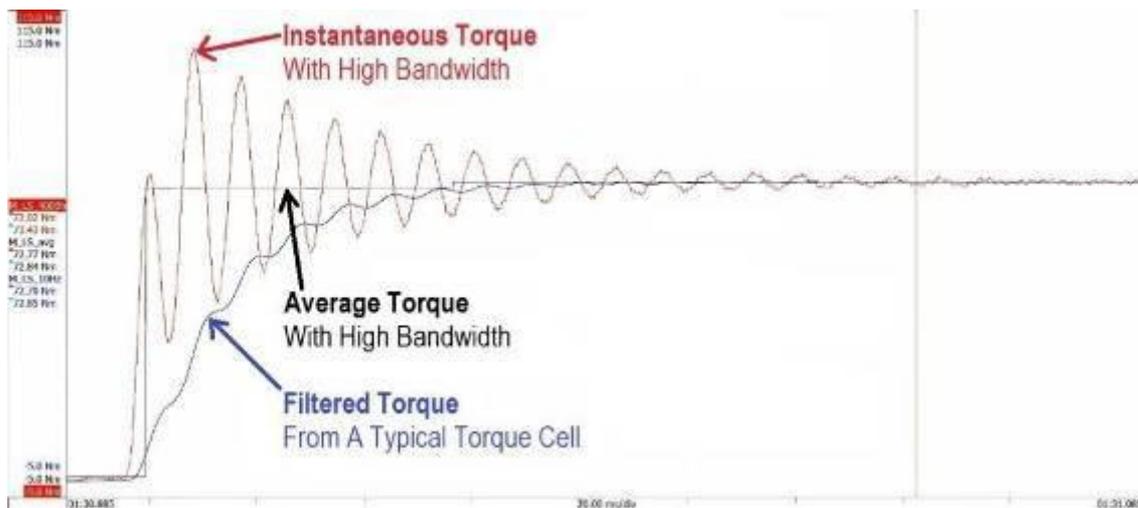


Fig. 2: Torque em um teste de motor altamente dinâmico de 0 Nm a um passo de carga de 70 Nm

Ver o torque dinâmico fornece as informações vitais sobre exatamente quando o torque é aplicado. Sistemas que possuem filtros possuem um atraso de fase. Observe o atraso entre o sinal vermelho de largura de banda total e o sinal azul filtrado. O tempo de subida também é severamente atrasado com o baixo valor do filtro e todas as dinâmicas são perdidas. O valor eventual é o mesmo que o torque médio baseado em ciclo, mas não se pode ver a dinâmica da oscilação de torque. Este é um sinal muito mais lento que perde toda a dinâmica e faz com que o teste requeira um período de tempo muito maior.

O sinal de torque médio por ciclo é quase instantâneo no valor comandado. Isto é devido a tomar uma média de tempo apropriada de todos os pontos indo igualmente maior e menor que a média, mesmo durante o tempo de estabilização. Isto fornece um número confiável para uma leitura eficiente, mas não dá sentido à dinâmica. A natureza baseada em ciclos da média calculada torna isso uma solução muito precisa, mesmo ao se fazer testes dinâmicos. No entanto, também não tem dinâmica. A combinação do valor médio e do valor instantâneo faz com

que o transdutor de torque de alta largura de banda combinado com uma contagem de ciclos em tempo real com média de um sistema DAQ, seja uma ferramenta muito poderosa para entender tanto a dinâmica quanto as médias de um sistema eletromecânico, especialmente durante as etapas de carga.

3. Oscilação de Torque

A oscilação de torque ocorre em motores síncronos de ímã permanente devido à distribuição de densidade de fluxo não senoidal ao redor do entreferro e à relutância de ímã variável do mesmo devido à distribuição de ranhuras do estator. Os efeitos da oscilação do torque são indesejáveis e mudam periodicamente com a posição do rotor. Os resultados são oscilações de velocidade que degradam o desempenho da máquina. Além disso, o ripple de torque pode excitar o trem de acionamento mecânico e, portanto, produzir ruído acústico e vibração indesejados.

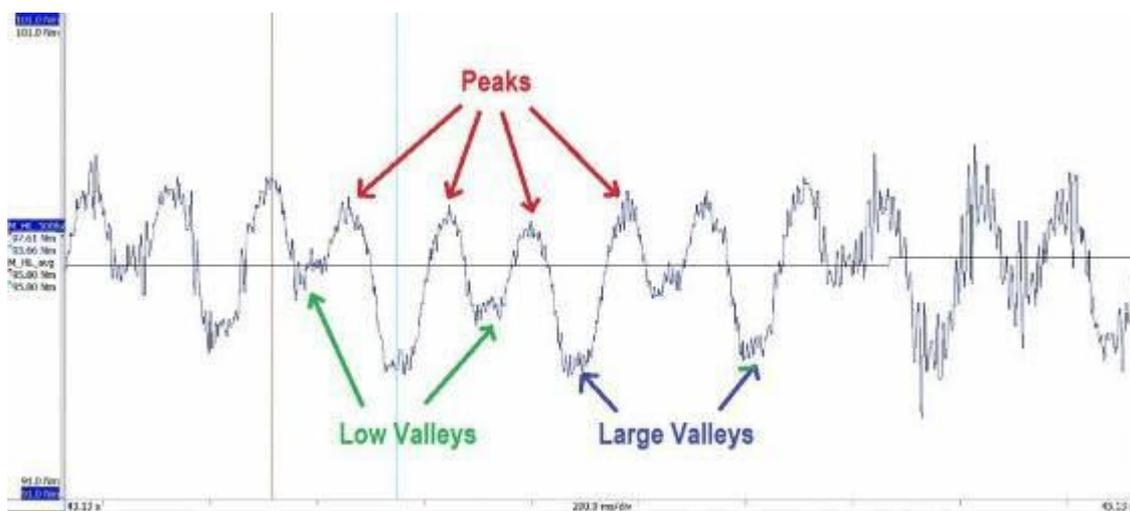


Fig. 3: A forma de onda do torque de relutância corresponde à geometria dos ímãs da máquina

A figura 3 mostra o torque de relutância causado pelos ímãs permanentes de uma máquina. Neste teste, um motor foi girado em baixa velocidade e carregado em diferentes níveis. Os observadores deste teste em particular ficaram muito animados ao ver uma oscilação de 2 Nm de uma máquina a 100 Nm, que é neste caso 2% do torque nominal. Uma medição de torque bem sucedida requer um transdutor com alta precisão e resolução. Isto significa que alguém que esteja procurando por um transdutor de torque deve prestar atenção, especialmente quando as especificações de valores que estão relacionados à escala completa, como a linearidade incl. histerese e coeficiente de temperatura do ponto zero TC0 são de maior significância. Isto é ainda mais importante, se considerarmos também os fatores de projeto relativos a valores nominais e máximos picos de torque da máquina elétrica. Pode-se ver um padrão distinto de picos e vales baixos e altos. Ao comparar a forma de onda com a geometria da máquina, notará que o padrão é, na verdade, o mesmo que a forma dos ímãs dentro da máquina. Isto pode ajudar a determinar como operar o controle ou quais regiões de operação devem ser evitadas com base no caso de uso da máquina. Esta oscilação irá variar de ponto de carga para ponto de carga. No caso de veículos elétricos, pode-se não querer operar em uma região de alta oscilação se o driver sentir isso na saída.

4. Mudança de Controle

Na figura 4, o sistema muda de um PWM para uma modulação de seis passos que pode ser facilmente visto na seção inferior. A tensão PWM azul tem uma corrente senoidal suave e, em seguida, ocorre uma mudança de controle e a corrente fica mais irregular. Olhando para a seção superior, pode-se ver o torque instantâneo em vermelho, os 10 Hz filtrados em azul e a média baseada em ciclos em preto. Antes da mudança de controle, o torque instantâneo em vermelho tem um ripple de torque cíclico significativo na ordem de 9 Nm pico a pico. Pode-se também ver que o torque está em fase com a corrente; no entanto, o torque azul filtrado tem uma redução de amplitude e um deslocamento de fase de cerca de 90 graus. A diferença de amplitude é reduzida a um pico de oscilação de 1 Nm em relação ao pico. Isto está obviamente incorreto do que realmente está acontecendo na máquina. Uma vez que a mudança acontece, o torque instantâneo tem uma ondulação de 50 Nm por 20 ms. Olhando para a média baseada em ciclo filtrada em azul ou mesmo preta, ambos os valores

parecem bastante estáticos durante a alteração. No entanto, instantaneamente há torques reversos e oscilações de carga em potencial. Isto é um evento muito traumático. Uma vez que o torque se estabilize em uma faixa cíclica, ainda há uma oscilação cíclica na ordem de 25 Nm de pico, enquanto a média está em torno de 11 Nm. Olhando para o torque médio baseado em ciclos, ele realmente possui resposta muito rápida. O torque médio do ciclo é muito mais rápido que o valor filtrado. Ao contrário do valor filtrado, ele não tem uma natureza cíclica, portanto, não precisa de tempo para ser calculado em média, apenas um número de ciclos.

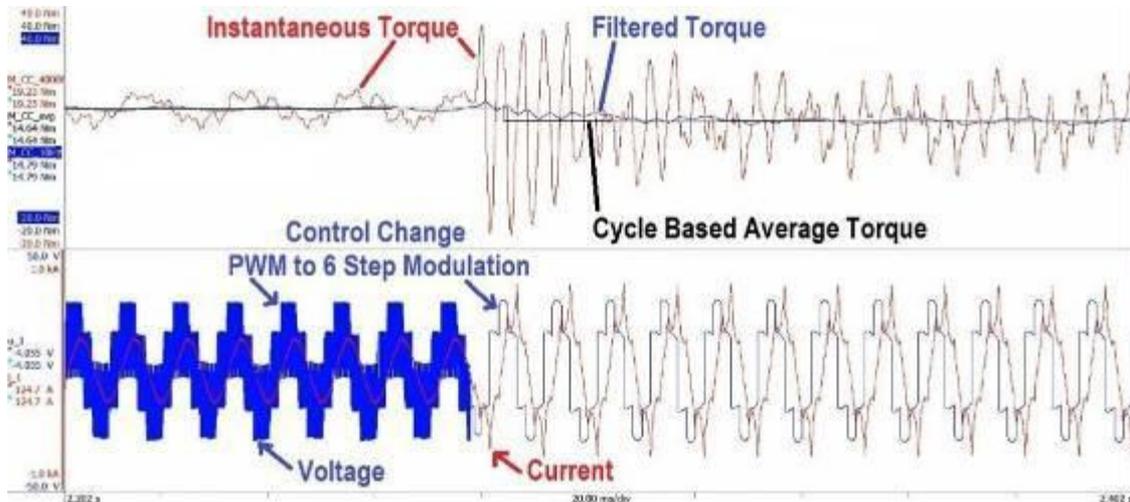


Fig. 4: Torque durante uma mudança de controle de PWM para modulação de seis passos

5. Conclusão

Fatores de projeto da máquina elétrica, por exemplo, a relação de máx. torque de pico vs. torque nominal têm um impacto na seleção do torque nominal de um transdutor de torque, que pode ser de 2-3 vezes maior. Em combinação com a oscilação de torque indesejada no sinal, que é apenas algumas porcentagens do torque nominal em um determinado ponto de carga, é óbvio que o transdutor de torque usado deve ter uma precisão e resolução muito boas para fornecer as informações necessárias para investigação.

Para testes dinâmicos, o torque deve ser medido instantaneamente com uma alta largura de banda de medição do sinal para obter a informação completa fornecida pelo sistema. O sistema HBM eDrive, que consiste nos transdutores de torque T40B ou T12HP da HBM e no sistema Genesis HighSpeed DAQ, oferece aos usuários a capacidade de adquirir sinais mecânicos e elétricos em uma mesma base de tempo.

Isto permite que você entenda como os sinais PWM do inversor sendo introduzidos na máquina elétrica afetam a saída de torque mecânica e as vibrações associadas. As amostras do eDrive são obtidas a uma taxa suficientemente alta para obter a largura de banda total do sensor. Ter toda a largura de banda nos permite observar transientes e oscilações de torque, além de obter uma média muito rápida da medição de torque.