

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE HARMÔNICOS DE SEQUENCIA NEGATIVA E ZERO EM MOTORES ELÉTRICOS CLASSES IE2, IE3 E IE4 COM LIGAÇÕES DELTA E ESTRELA

Iago R. M. R. Morais, Jonathan M. Tabora, Thiago M. Soares, M^a Emilia L. Tostes, Edson M. Ortiz, Ubiratan H. Bezerra.

*Universidade Federal do Pará. Belém, Pará
Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazonia*

Abstract: The presence of harmonics in electrical systems results in increases in consumption, temperature, and a reduction in the useful life of electric motors. Based on the above, the impact on these parameters could be reduced in the star connection (380 Volts), where a lower input current is obtained and with which the negative effects could be reduced. This work carries out an evaluation of the impacts of the 2nd and 3rd harmonics of negative and zero sequences in electric motors classes IE2, IE3 and IE4 connected in delta and star. The results show that the temperature is not affected to a great extent by the motor terminals connection, presenting small differences for the 3 analyzed motors.

Resumo: A presença de harmônicas em sistemas elétricos resulta em aumento de consumo, temperatura e redução da vida útil dos motores elétricos. Com base no exposto, o impacto sobre esses parâmetros poderia ser reduzido na conexão estrela (380 Volts), onde uma corrente de entrada menor é obtida e com a qual os efeitos negativos podem ser reduzidos. Este trabalho realiza uma avaliação dos impactos dos 2º e 3º harmônicos de sequência negativa e zero em motores elétricos das classes IE2, IE3 e IE4 conectados em triângulo (220Volts) e estrela (380 Volts). Os resultados mostram que a temperatura não é afetada de forma considerável pela conexão nos terminais do motor, apresentando pequenas diferenças para os 3 motores analisados.

Keywords: Efficiency classes, temperature, harmonics, line-start permanent magnet motor, motor terminal connection..

Palavras-chaves: Classes de Eficiência, temperatura, harmônicos, motor de ímãs permanentes, ligação do motor.

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos nos últimos anos têm permitido a implementação de eletrônica na maioria dos equipamentos utilizados na atualidade. O setor industrial tem sido beneficiado com os avanços da eletrônica, com incrementos na produtividade e eficiência energética, bem como, maior qualidade nos produtos e menores períodos de parada dos equipamentos, além das novas projeções com a indústria 4.0 que visam ter instalações com processos de fabricação inteligentes (Masood and Sonntag, 2020).

Apesar dos grandes benefícios que a eletrônica traz no setor industrial, comercial e residencial, os equipamentos eletrônicos são também responsáveis por gerar determinados distúrbios nos sistemas elétricos, dentre eles, os harmônicos de tensão e de corrente, os quais provocam aumento das perdas, e consequentemente da temperatura, mal funcionamento dos equipamentos e redução da sua vida útil (Michalec et al., 2021; Muñoz Tabora et al., 2020; Wagner et al., 1993).

Dentro das indústrias, os motores elétricos representam a principal carga, e também são um equipamento sensível ante aos harmônicos de tensão e de corrente, causando torques contrários, incremento no consumo elétrico, temperatura e consequentemente redução da sua vida útil (M. Tabora et al., 2019; Muñoz Tabora et al., 2020; Neves et al., 2016; Rashevskaya et al., 2018).

O incremento no consumo dos motores elétricos se deve principalmente as correntes harmônicas nas distintas frequências e que se somam a componente fundamental, incrementando seu valor, no entanto, apenas a corrente de frequência fundamental pode fornecer potência real, se traduzindo o restante em perdas (“Computational Paradigm Techniques for Enhancing Electric Power Quality,” 2018.). Correntes maiores podem ser prejudiciais em condições nas quais as proteções não estão devidamente dimensionadas, o que permite que o motor opere com sobrecargas acima do seu fator de serviço.

Dado que os motores são construídos para operar a diferentes níveis de tensão (220V- Δ /380V-Y) as sobrecargas são mais prejudiciais para os motores conectados no menor nível de tensão (Δ) pois as

correntes são maiores, nesse sentido a operação de motores com tensões maiores (Y), ou seja, com correntes menores, pode ser uma alternativa para evitar os efeitos negativos das sobrecargas e redução da vida útil do motor elétrico.

Na presença de harmônicos nos sistemas elétricos e seus impactos negativos nos motores elétricos, medidas para diminuir suas consequências devem ser consideradas, assim, o presente trabalho visa analisar o impacto dos harmônicos de 2ª e 3ª ordem em motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4, conectados em ligação Delta e Estrela, o último sendo um motor de ímãs permanentes e gaiola de esquilo.

A partir dos resultados será possível avaliar os benefícios dos níveis de tensão em motores elétricos na presença de harmônicos de tensão, bem como comparar diferentes tecnologias na presença desse distúrbio.

2 Motores Elétricos na Indústria

Os motores elétricos representam aproximadamente 68% do consumo de energia no setor industrial do Brasil ("Ministério de Minas e Energia, "Plano Nacional de Energia 2030", 2007.). A substituição dos motores antigos/não eficientes é uma prioridade nacional por mérito das políticas de eficiência energética como ser os índices de rendimento mínimo a ser fabricado/comercializado no Brasil, e definido em IR3, a partir de março de 2020 (Nacional, n.d.).

Diferentes estudos analisando a substituição entre tecnologias tem sido apresentados em (Ferreira et al., 2015; Ferreira and de Almeida, 2016; Tabora et al., 2021), os benefícios dos motores mais eficientes em termos de consumo, temperatura, e uma operação mais silenciosa são comentados, e os respectivos benefícios econômicos produto das melhoras nos materiais e projeto das novas tecnologias. A Figura 1 apresenta o circuito equivalente de um motor de indução com gaiola de esquilo e suas respectivas perdas.

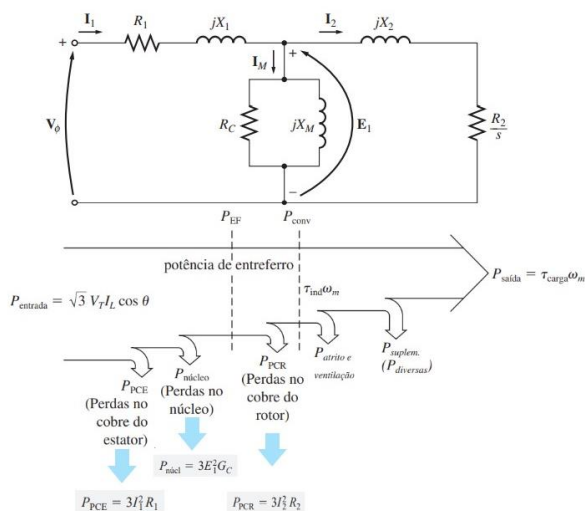


Figura 1 – Distribuição das perdas em motores de indução (Chapman and Laschuk, 2013, p. 337).

Dessa forma a redução das perdas se obteve com melhorias nos materiais ativos como maior quantidade de cobre, chapa magnética com menores perdas em W/kg, bem como a introdução de novas tecnologias como ímãs permanentes no rotor da máquina. Com essas melhorias a substituição dos motores antigos se mostra como uma solução viável visando economias, bem como uma maior confiabilidade nos processos industriais, no Brasil diferentes plataformas podem ser utilizadas visando analisar a viabilidade da substituição, incluindo o BD Motor da CEPTEL ("SOMA BD Motor," n.d.), entre outros sites dos fabricantes ("See+," n.d.).

3 Harmônicos em Motores Elétricos

Os harmônicos nos motores elétricos podem ser classificados como harmônicos de sequência positiva, negativa e zero cujos impactos variam de acordo com a ordem e magnitude presente, bem como da ligação na entrada do motor elétrico. A Tabela 1 apresenta as respectivas ordens e sequências.

Tabela 1 – Sequências em harmônicos

Sequência harmônica		
Sequência Positiva (+)	Sequência Negativa (-)	Sequência Zero (0)
Ordem Harmônica	Ordem Harmônica	Ordem Harmônica
1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15

De acordo com a literatura, os harmônicos de sequência negativa resultam em maiores impactos negativos devido ao seu campo magnético de rotação oposta, diferente dos harmônicos de sequência positiva que resultam em torque positivo, enquanto os harmônicos de sequência zero não resultam em impactos consideráveis devido à maioria dos motores estarem conectados em uma conexão em delta ou estrela não aterrada.

Os harmônicos também são divididos em harmônicos de tempo e espaço, estes últimos mais relacionados à geometria do motor e são considerados principalmente por engenheiros de projeto. As perdas produzidas por harmônicos de espaço resultam em perdas adicionais, geralmente agrupadas com perdas dispersas. Embora não possam ser eliminados devido à interação magnética dos condutores nas ranhuras, podem ser reduzidos com um bom projeto do motor.

A presença de harmônicos de sequência positiva, negativa e zero resulta em perdas adicionais em cada um dos componentes, a Figura 2 apresenta essa situação.

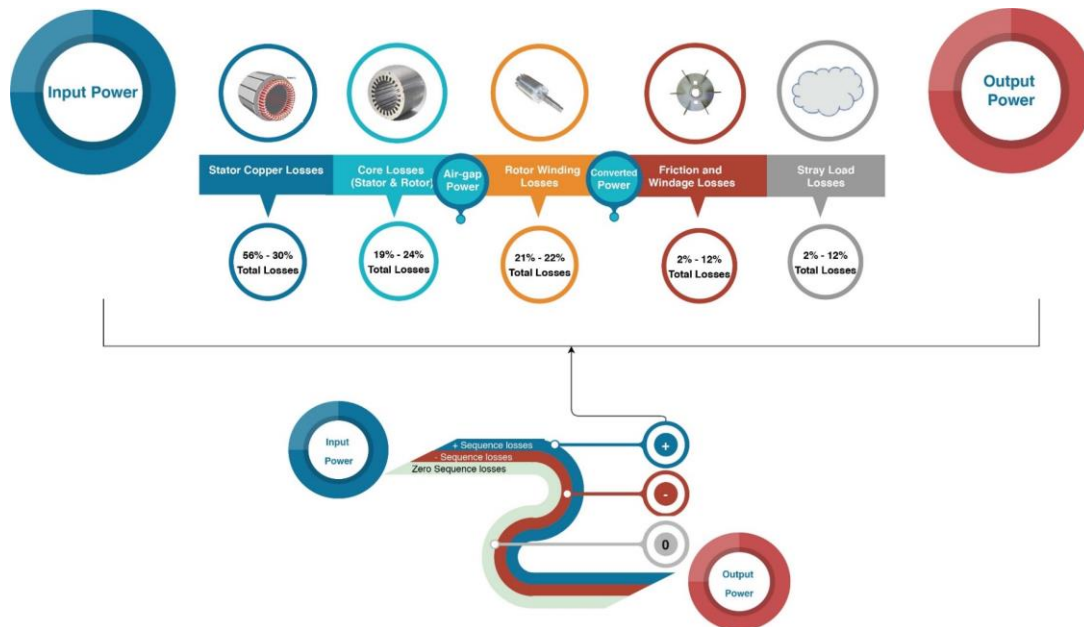


Figura 2 – Distribuição das perdas em motores elétricos na presença de harmônicos.

4 Metodologia e resultados

2.1 Metodologia

Para alimentar a bancada e gerar as distorções harmônicas foi utilizada uma fonte programável CA trifásica modelo FCATHQ da marca *Supplier* que é capaz de gerar sinais senoidais puro com distorções harmônicas até 50ª ordem e de magnitude variadas. As informações de tensão e corrente foram registradas utilizando um analisador de qualidade de energia de marca HIOKI, modelo PW3198-90 e classe A.

Para a simulação da carga no eixo do motor foi utilizado um freio de Foucault de dois núcleos e calibrado para que o torque induzido se aproxime de 92% a 95% do torque nominal dos motores, o que corresponde a 3.8Nm. A bancada de testes é mostrada na figura 3 e 4.

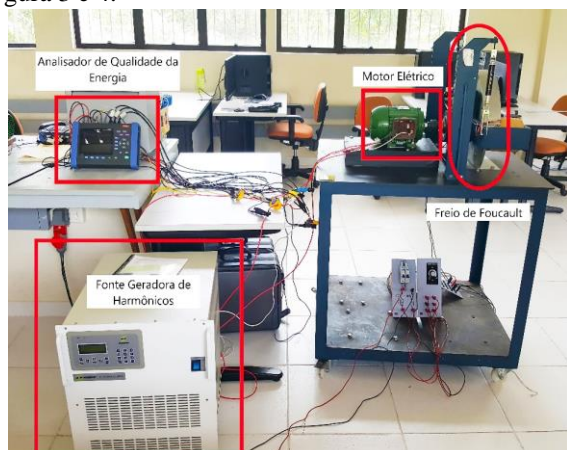


Figura 3 - Bancada de testes

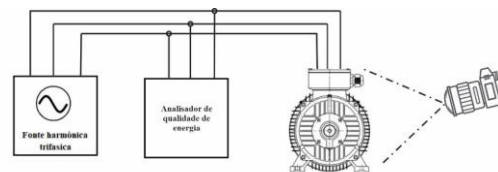


Figura 4 – Esquemático do experimento

Os dados dos motores utilizados nos testes são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da máquina de indução

Classe do Motor	IE2	IE3	IE4
Tecnologia do Motor	SCIM	SCIM	LSPM
Potência Nominal	1 cv	1 cv	1 cv
Tensão Nominal	220 V/380 V	220 V/380 V	220 V/380 V
Velocidade nominal (r/min)	1730 RPM	1725 RPM	1800 RPM
Torque Nominal (Nm)	4,12	4,13	3,96
Corrente Nominal (A)	2,98/1,73	2,91/1,68	3,08/1,78
Eficiência Nominal (%)	82,60	82,6	87,4
Fator de Potência Nominal	0,80	0,82	0,73

Para a análise térmica, imagens termográficas foram registradas da carcaça dos motores analisados utilizando uma câmera modelo T620 do fabricante FLIR, com uma emissividade de 0,94, essa emissividade é correspondente ao tipo de pintura da carcaça dos motores analisados.

Os testes ocorreram de forma que primariamente os motores alcançassem a temperatura de regime de trabalho com uma tensão senoidal sem distorções de

220 Volts para o fechamento em delta (Δ) e de 380 Volts para o fechamento em estrela (Y) por um intervalo de uma hora e dez minutos. Após estabelecido a temperatura de trabalho estabelecer-se, é incrementado 2% na magnitude da distorção analisada a cada 10 minutos até atingir 25% de distorção harmônica de tensão.

A captura das imagens termográficas é realizada no momento 10 minutos do teste para cada porcentagem de magnitude de distorção e sempre são capturadas no mesmo ângulo lateral perpendicular ao motor, conforme a figura 5.

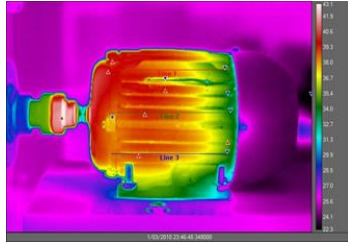


Figura 5 - Ângulo de captura da imagem termográfica

2.2 Resultados

2.2.1 Motor de alto rendimento IE2

A presença de harmônicos de tensão resulta em correntes harmônicas que somadas com a componente fundamental, resultam em maiores correntes de entrada o que se traduz em perdas e consequentemente incremento da temperatura.

Na figura 6 as correntes no motor classe IE2 são apresentadas para as ligações Delta e Estrela, é possível observar a semelhança das formas de onda para ambas as ligações, porém com uma diferença nas magnitudes devido as tensões de alimentação. Pode-se observar como os efeitos da distorção harmônica é perceptível mais cedo na ligação delta, com distorções maiores a 6% do 2º harmônico, o que só é perceptível para 14% no motor conectado em ligação estrela.

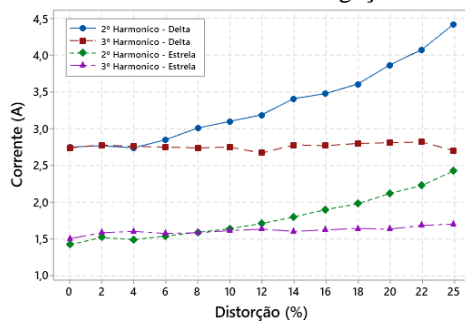


Figura 6. Variação de corrente versus distorção em motor classe IE2 para ligações delta e estrela.

No motor de alto rendimento o 2º harmônico de sequência negativa resultou nas maiores temperatura na carcaça do motor (figura 7) tanto para ligação em delta quanto em estrela, enquanto para o harmônico de 3ª ordem, as curvas de temperatura foram compatíveis, ocorrendo somente um leve deslocamento positivo para ligação estrela.

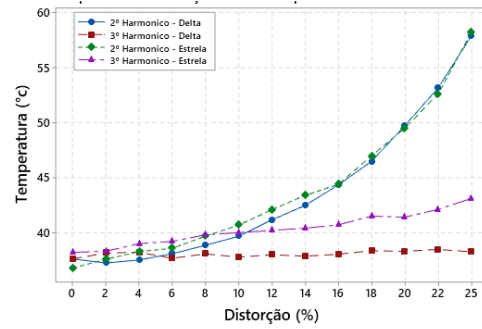


Figura 7 - Variação de Temperatura versus distorção em motor classe IE2 para ligações delta e estrela.

Uma conclusão importante a partir do gráfico apresentado na Figura 7 é o fato de que apesar da diferença nas correntes, as temperaturas apresentam os mesmos valores, o que pode ser justificado nas perdas do núcleo ($P_{Núcleo} = G_c E_1^2$) que dependem da tensão de alimentação e as perdas de Joule que variam com a corrente ($P = RI^2$) ambas resultando em incrementos semelhantes na temperatura do motor.

Com relação ao conteúdo harmônico, a taxa de distorção harmônica de corrente (THDI) foi analisada. A Figura 8 apresenta o incremento desse parâmetro com relação a fase “a” do motor classe IE2, pode se observar como incrementos semelhantes são observados para os harmônicos de 2ª ordem para ambas as ligações, enquanto o terceiro só apresentou incrementos para a ligação estrela.

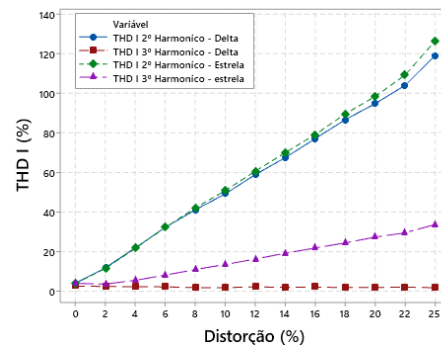


Figura 8 – Distorção harmônica total de corrente para motor classe IE2.

2.2.2 Motor Premium IE3

A implementação de melhoras se traduz em menores consumos para os motores mais eficientes. Na Figura 9 pode-se observar como o motor classe IE3 apresenta menores correntes de entrada para a mesma carga conectada do motor classe IE2, o que se traduz em benefícios econômicos para os usuários.

Logo, com a presença de harmônicos de tensão, correntes harmônicas surgem o que resulta no incremento da corrente fundamental, porém com uma diminuição de mais do 10% da corrente com relação ao motor classe IE2.

O 2º harmônico em ligação estrela apresenta um aumento na sua magnitude com o incremento na distorção harmônica, que no grau mais severo do teste chega a se igualar ao 3º harmônico em ligação delta. O 3º harmônico ligado em estrela não impacta

substancialmente na magnitude das correntes, chegando no máximo em aproximadamente em 1.75A.

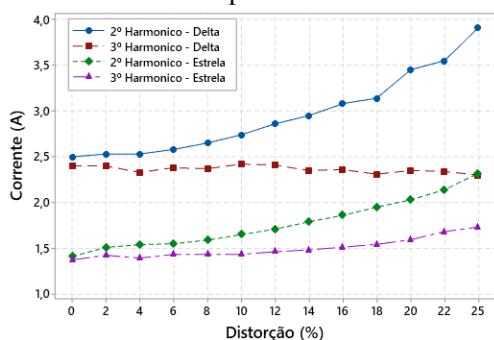


Figura 9 - Variação de corrente versus distorção em motor classe IE3 para ligações delta e estrela.

Apesar do motor *premium* apresentar uma diminuição nas correntes com relação ao motor de alto rendimento, também apresentou maiores temperaturas de operação (Figura 10), com valores de até 65 °C para o 25% de distorção de segundo harmônico. Observa-se também que menores temperaturas são observadas para a ligação em delta para o mesmo harmônico. Já o terceiro harmônico resulta em maiores temperaturas para a ligação estrela, como esperado.

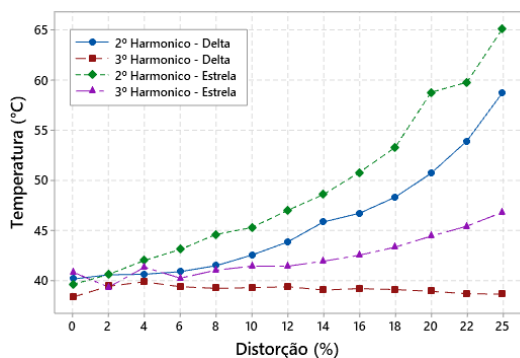


Figura 10. Variação de Temperatura versus distorção em motor classe IE3 para ligações delta e estrela.

A presença de segundo harmônico também resultou em incrementos no conteúdo harmônico da corrente, valores semelhantes aos do motor classe IE2 foram observados, como apresentado na Figura 11. A principal diferença observada foi um maior incremento para o 3º harmônico na ligação estrela que superou o 60% do THDI.

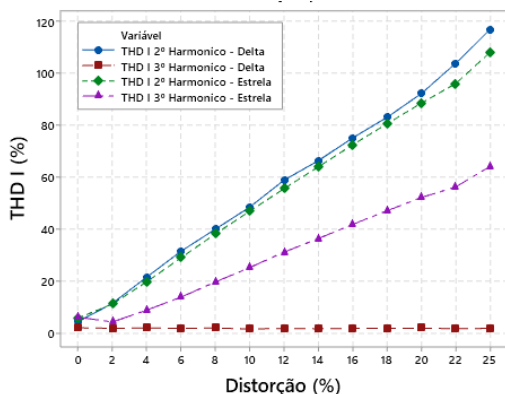


Figura 11 - Distorção harmônica total de corrente para motor classe IE3.

2.22 Motor híbrido IE4

O motor de ímãs permanentes apresentou as menores correntes de entrada para a condição sem distorção com relação aos motores classes IE2 e IE3, porém, na presença de harmônicos de 2ª e 3ª ordens apresentou maiores incrementos que seus predecessores, como observado na Figura 12. Observa-se como o segundo harmônico na ligação delta resulta ser o mais prejudicial com valores de até o dobro da corrente inicial para ambas as ligações em delta e estrela.

Já o terceiro harmônico resultou em maiores incrementos para a ligação estrela, no qual para os outros motores o 3º harmônico para ligação estrela tem a sua elevação quase imperceptível ou acontece de forma tardia, nesse caso atingiu valores próximos aos nominais na ligação delta.

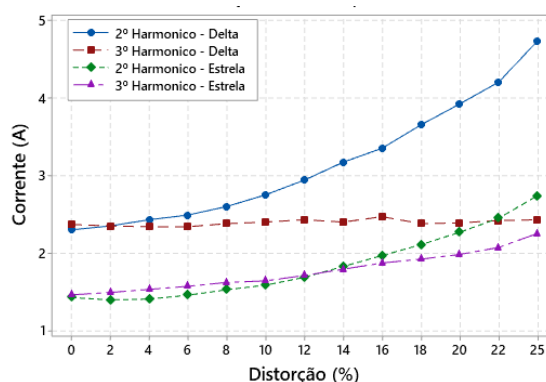


Figura 12 - Variação de corrente versus distorção em motor classe IE4 para ligações delta e estrela.

Os motores com a tecnologia de ímãs permanentes são mais sensíveis a eventos de qualidade de energia (Tabora et al., 2020), na figura 12 podemos observar que a curva descrita pela temperatura é mais íngreme que para os outros motores, principalmente para o 3º harmônico. É possível observar também que até 10% de distorção harmônica esse motor não apresenta grande variação de temperatura.

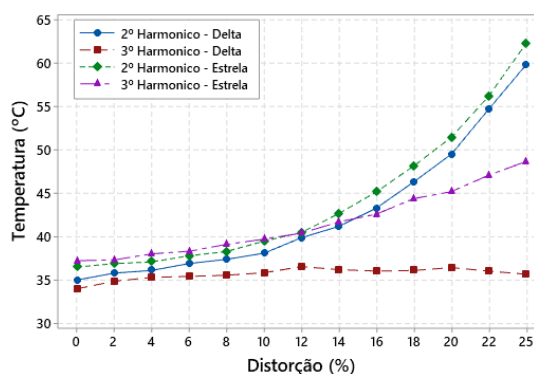


Figura 4 - Variação de Temperatura versus distorção em motor classe IE4 para ligações delta e estrela.

O motor de ímãs permanentes também apresentou maiores incrementos no THDI, pode-se observar na figura 13 como inicialmente já apresenta porcentagens maiores aos dos motores classe IE2 e IE3, com valores próximos ao 8% para a ligação delta e maiores a 20% para a ligação estrela.

para a ligação em estrela. Já com a presença de harmônicos de tensão de 2ª e 3ª ordem THDI de até 160% são encontrados para o 2º harmônico de sequência negativa bem como de 120% para o 3º harmônico de sequência zero na ligação estrela.

Com relação a ligação delta o terceiro harmônico não provocou incrementos no THDI, com valores constantes de 8% mesmo na condição de 25% de distorção de 3ª ordem.

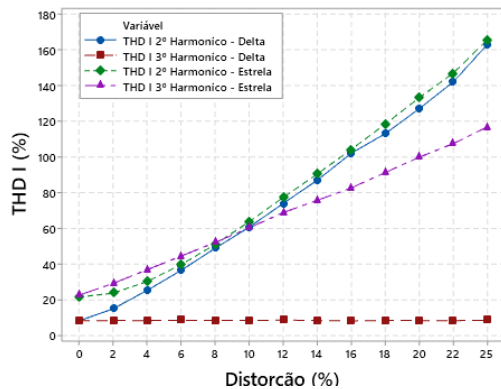


Figura 5 - Distorção harmônica total de corrente para motor classe IE4.

3 Conclusão

Este trabalho apresentou uma avaliação dos impactos de harmônicos de 2ª e 3ª ordens em motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4 conectados em ligação delta e estrela na entrada.

De forma geral foi observado como os motores mais eficientes apresentam menores consumos sem a presença de harmônicos de tensão, sendo o motor de ímãs permanentes (classe IE4) o que apresentou as menores correntes de entrada, porém com maiores taxas de distorção harmônica com relação aos seus predecessores. Logo com a presença de harmônicos de tensão, os resultados mostraram que o motor classe IE3 apresentou os menores incrementos na corrente, porém com maiores temperaturas operacionais.

O motor classe IE2 apresentou maior tolerância na temperatura ante os distúrbios analisados quando comparado com os motores classes IE3 e IE4 para a potência analisada.

Com relação as ligações de entrada dos motores, foi observado como com relação as correntes, a ligação estrela (380 V) permite menores correntes operacionais na presença dos harmônicos e porcentagens de distorção analisados, porém com incrementos de temperatura semelhantes aos observados na ligação delta, com o qual estudos mais detalhados para verificar se o incremento se deva as perdas do núcleo serão analisadas em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq para o desenvolvimento do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

- Chapman, S.J., Laschuk, A., 2013. Fundamentos de Máquinas Elétricas, 5ª edição. ed. AMGH.
- Computational Paradigm Techniques for Enhancing Electric Power Quality [WWW Document], n.d. . Routledge & CRC Press. URL <https://www.routledge.com/Computational-Paradigm-Techniques-for-Enhancing-Electric-Power-Quality/Kumar-Alexander/p/book/9780367570675> (accessed 9.23.21).
- Ferreira, F.J.T.E., de Almeida, A.T., 2016. Energy savings potential associated with stator winding connection mode change in induction motors, in: 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Presented at the 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2775–2783. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732915>
- Ferreira, F.J.T.E., Leprettre, B., Duarte, A.Q., De Almeida, A.T., 2015. Comparison of protection requirements in IE2-, IE3-, and IE4-class motors, in: 2015 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC). Presented at the 2015 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC), pp. 1874–1880. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2015.7409320>
- M. Tabora, J., Soares, T.M., Tostes, M.E., Ortiz de Matos, E., Moreira, C.E., 2019. Jonathan, M.T.; Soares, T.M.; Tostes, M.E.d.L.; Ortiz de Matos, E.; Moreira, C.E. Impactos do 5o Harmônico na Temperatura de Motores Elétricos Classes IE2, IE3 e IE4. In Proceedings of the Brazilian Conference on Electric Quality (CBQEE), São Paulo, Brazil, 22–25 October 2019; p. 6., in: Impactos Do 5o Harmônico Na Temperatura de Motores Elétricos Classes IE2, IE3 e IE4. Presented at the Brazilian Conference on Electric Quality (CBQEE), São Paulo, p. 6.
- Masood, T., Sonntag, P., 2020. Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. Computers in Industry 121, 103261. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>
- Michalec, Ł., Jasiński, M., Sikorski, T., Leonowicz, Z., Jasiński, Ł., Suresh, V., 2021. Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network—Review and Case Study. Energies 14, 3665. <https://doi.org/10.3390/en14123665>
- Ministério de Minas e Energia, "Plano Nacional de Energia 2030 " [WWW Document], n.d. URL <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030> (accessed 9.23.21).
- Muñoz Tabora, J., de Lima Tostes, M.E., Ortiz de Matos, E., Mota Soares, T., Bezerra, U.H., 2020. Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes. Energies 13, 3333. <https://doi.org/10.3390/en13133333>
- Nacional, I., n.d. PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 1, DE 29 DE JUNHO DE 2017 - Imprensa Nacional [WWW Document]. URL <https://www.in.gov.br/materia> (accessed 9.23.21).
- Neves, A.B.F., Mendonça, M.V.B. de, Filho, A. d L.F., Rosa, G.Z., 2016. Effects of voltage unbalance and harmonic distortion on the torque and efficiency of a Three-Phase Induction Motor, in: 2016

- 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Presented at the 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 943–948. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783350>
- Rashevskaya, M., Yanchenko, S., Tsyruk, S., 2018. Assessment of non-stationary harmonic distortion related to adjustable speed induction motor and soft starters, in: 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA). Presented at the 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SIELA.2018.8447097>
- See+ [WWW Document], n.d. URL <https://www.weg.net/see+/pages/regua.jsp> (accessed 9.23.21).
- SOMA BD Motor [WWW Document], n.d. URL <https://bdmotor.cepel.br/> (accessed 9.23.21).
- Tabora, J.M., Andrade, V.B., Lima, C.M., de Moura Carvalho, C.C.M., Paixão, U.J., Da Silva, J.C.A., de Lima Tostes, M.E., de Matos, E.O., Bezerra, U.H., 2021. Induction Motors Assessment: A Substitution Case Analysis, in: 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). Presented at the 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), pp. 783–789. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529738>
- Tabora, J.M., De Lima Tostes, M.E., De Matos, E.O., Bezerra, U.H., Soares, T.M., De Albuquerque, B.S., 2020. Assessing Voltage Unbalance Conditions in IE2, IE3 and IE4 Classes Induction Motors. IEEE Access 8, 186725–186739. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>
- Wagner, V.E., Balda, J.C., Griffith, D.C., McEachern, A., Barnes, T.M., Hartmann, D.P., Phileggi, D.J., Emmanuel, A.E., Horton, W.F., Reid, W.E., Ferraro, R.J., Jewell, W.T., 1993. Effects of harmonics on equipment. IEEE Transactions on Power Delivery 8, 672–680. <https://doi.org/10.1109/61.216874>