



Influência do Passo de Enrolamento no Alternador

Claudia Cristina Jansen
WEG Energia
Brasil
claudia1@weg.net

1. INTRODUÇÃO

O presente artigo tem por objetivo abordar o efeito do passo no paralelismo de geradores e apresentar as vantagens e desvantagens do passo do enrolamento do estator, além de, como ele afeta o desempenho e o conteúdo harmônico do alternador.

2. HARMÔNICAS DE TENSÃO

O alternador gera uma forma de onda de tensão que é descrita em termos da magnitude da tensão, sua frequência fundamental e da magnitude das harmônicas de tensões em suas frequências.

As harmônicas são múltiplas da frequência fundamental da forma de onda gerada pelo alternador. Devido os alternadores serem magneticamente simétricos, apenas harmônicas ímpares são prejudiciais e as harmônicas de menor ordem, pois quanto maior a ordem menor a magnitude da harmônica.

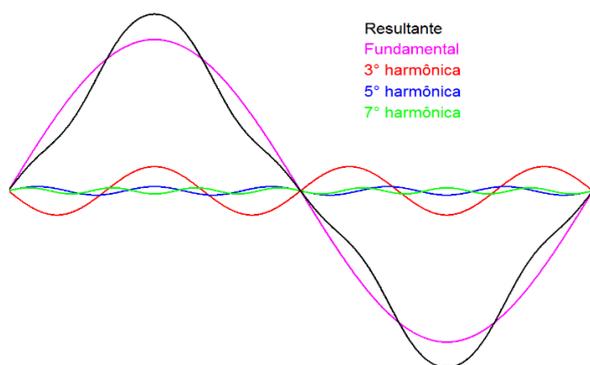
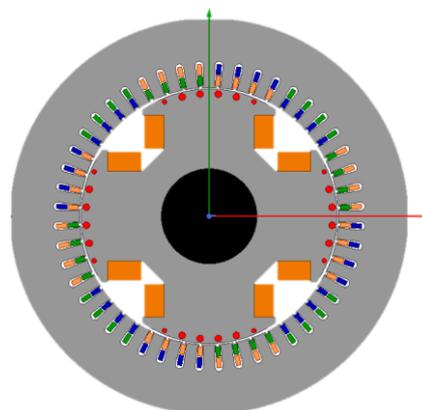


Figura 1: Relação da forma de onda com harmônicas

A Figura 1 apresenta a forma de onda resultante junto com as harmônicas de 3º, 5º e 7º ordem e a fundamental. Percebe-se que há afundamentos na forma de onda resultante quando a harmônica de 3º ordem é negativa e um pico quando a harmônica de 3º ordem é positiva, isso ocorre com as outras harmônicas também, porém nesse exemplo a de 3º ordem possui uma magnitude maior.



2.1. Efeitos das harmônicas

As harmônicas geram efeitos indesejáveis no alternador que podem ocasionar falhas na máquina e nas cargas que estão sendo alimentadas.

O problema mais crítico é o aquecimento do enrolamento, no núcleo e no rotor que as harmônicas geram, pois pode sobreaquecer a máquina.

As harmônicas de 3º ordem resultam em corrente no neutro, que pode fluir entre máquinas em paralelo ou se o neutro de uma ligação estrela for aterrado, essa corrente pode criar tensões permanentes no terra e causar problemas no sistema de telecomunicações. Além disso, também dificulta o projeto dos painéis elétricos, pois instrumentos que não são True RMS não conseguem fazer a leitura e os relés de proteção podem não atuar corretamente.

No entanto, as harmônicas de 5º e 7º ordem resultam no aumento das perdas no ferro e no cobre pelo efeito skin, pois estão em uma frequência mais alta. Se a carga for um motor, os harmônicos de alta frequência induzirão o dobro de suas próprias frequências no rotor do motor, gerando assim sobreaquecimento que reduzirá a vida útil do isolamento do motor.

Quando a carga for capacitiva os harmônicos de 5º e 7º ordem reduzem a reatância capacitiva, o que permite um aumento do fluxo de corrente harmônica, resultando em distorção da forma de onda.

Cargas não lineares geram altas correntes harmônicas que geram distorção na forma de onda do alternador, se forem monofásicas e conectadas de forma balanceada no alternador trifásico, as correntes da 3ª harmônica somam no neutro resultando em uma corrente de neutro alta.

Outro fator é a forma de onda da tensão, pois quanto mais harmônicas tiver em uma onda gerada, maior a distorção da onda de tensão. Quando a distorção for muito alta o regulador de tensão terá dificuldade na detecção, tornando as leituras imprecisas e dificultando a regulação da tensão.



3. PASSO DO ENROLAMENTO

O passo de enrolamento é a disposição geométrica das bobinas nas ranhuras do estator. Existem máquinas de passo pleno e de passo fracionário.

O passo pleno é quando a disposição da bobina está exatamente em um passo de polo do rotor (Figura 2), já o passo fracionário é quando a disposição da bobina é menor que um passo de polo do rotor (Figura 3 e Figura 4).

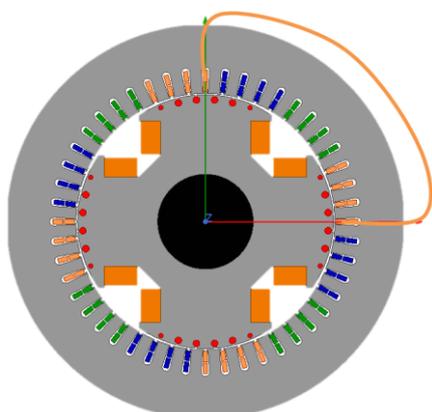


Figura 2: Enrolamento de passo pleno

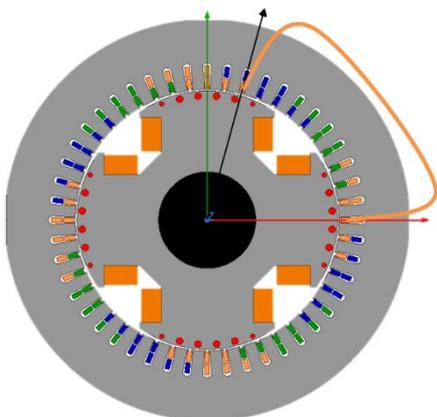


Figura 3: Enrolamento de passo fracionário (5/6)

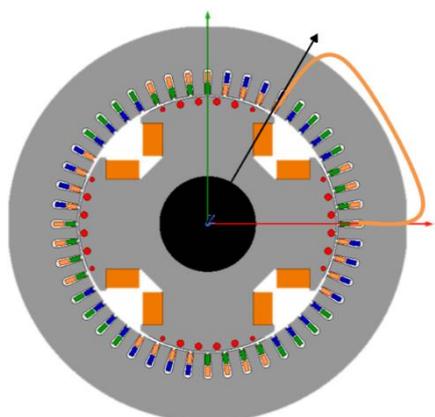


Figura 4: Enrolamento de passo fracionário (2/3)

4. PASSO x HARMÔNICAS

O passo de enrolamento é um dos parâmetros de projeto que determina o conteúdo harmônico na onda da tensão. Dependendo do passo utilizado na máquina, ele pode eliminar algumas harmônicas, mas infelizmente não elimina todas e, por consequência, ainda pode aumentar outras harmônicas.

Enrolamentos de passo 2/3 eliminam as harmônicas de 3º ordem, porém, podem aumentar as harmônicas de 5º e 7º ordem, conforme Figura 5.

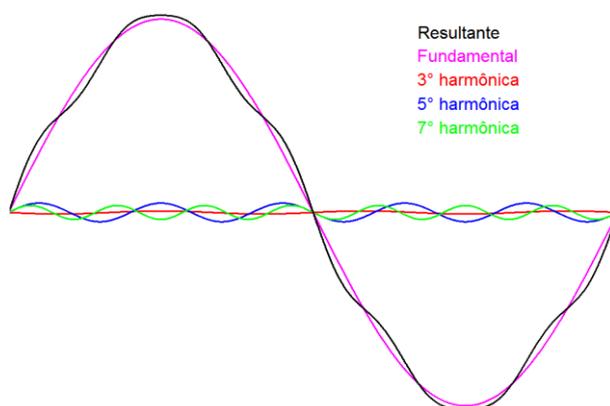


Figura 5: Harmônicas com enrolamento de passo 2/3

Enrolamentos de passo 5/6 eliminam as harmônicas de 5º e 7º ordem, porém, podem aumentar as harmônicas de 3º ordem, conforme Figura 6.

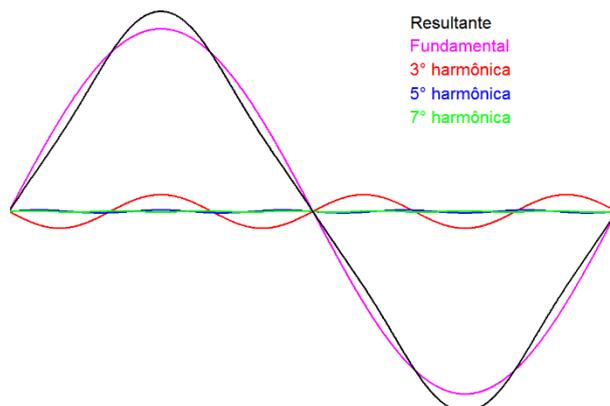


Figura 6: Harmônicas com enrolamento de passo 5/6

5. PARALELISMO DE GERADORES

Existem alguns cuidados que se devem ter ao conectar geradores em paralelo, como um sistema de excitação capaz de garantir o compartilhamento de kVAR, motor capaz de compartilhar kW, ambos os geradores com a mesma porcentagem de



queda de tensão na partida de carga, conteúdo harmônico da forma de onda, etc.

O problema mais crítico é a corrente de circulação entre os geradores. Essa corrente é gerada quando tem diferença na forma de onda da tensão entre as duas máquinas, fazendo a corrente de 3º harmônica circular entre as máquinas que tenham ligação Y com o neutro aterrado, conforme mostra a Figura 7.

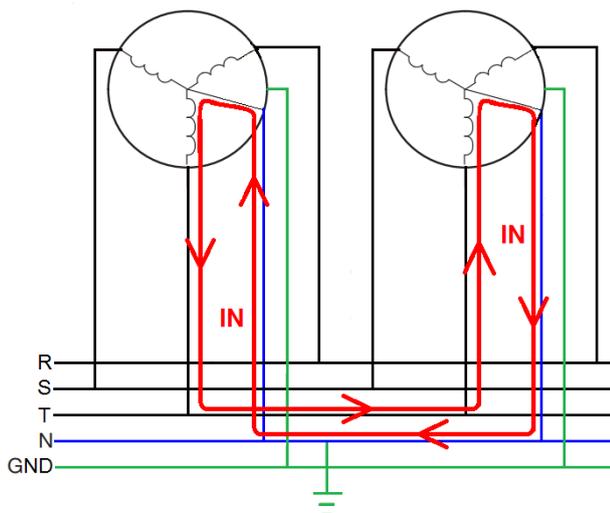


Figura 7: Corrente de neutro circulante

Essa diferença entre as formas de onda das tensões ocorre devido às harmônicas geradas. Quando dois alternadores ligados em paralelo tiverem o mesmo conteúdo harmônico, não haverá corrente de neutro circulante.

Como a corrente que circula pelo neutro entre uma máquina e outra é a corrente da 3º harmônica, a amplitude dela é que terá maior influência.

Assim, podemos escrever que a quantidade de corrente de neutro que circula entre geradores em paralelo depende da diferença das amplitudes das tensões de 3º harmônica geradas e da reatância dos geradores, conforme equação abaixo:

$$I_{T3} = \frac{V'_3 - V''_3}{(X_{01} + X_{02} + XL)}$$

I_{T3} = Corrente total da terceira harmônica;
 V'_3 = Amplitude da terceira harmônica do primeiro gerador;
 V''_3 = Amplitude da terceira harmônica do segundo gerador;
 X_{01} = Reatância de sequência – zero do primeiro gerador;
 X_{02} = Reatância de sequência – zero do segundo gerador;
 XL = Reatância indutiva da linha de conexão.

Pode-se observar pela equação que quanto maior a diferença entre as tensões de 3º harmônica e quanto menor a reatância de sequência zero, maior será a corrente circulante entre os neutros dos geradores. A Figura 8 apresenta a corrente

resultante que circula entre dois geradores quando os mesmos possuem diferença na amplitude da 3º harmônica.

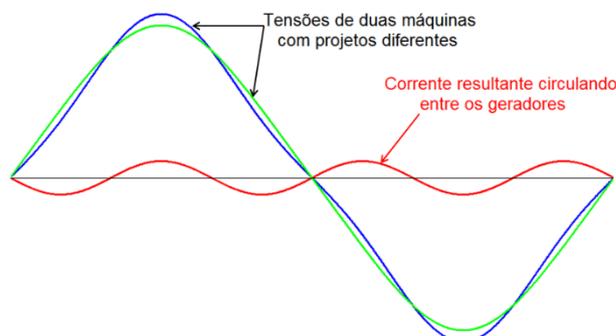


Figura 8: Corrente de neutro circulante e tensões resultantes das duas máquinas

Para evitar a corrente de neutro circulante, é recomendado que ambas as máquinas tenham o mesmo projeto utilizando o passo 2/3, para que as formas de onda das tensões sejam iguais, resultando em uma corrente nula. Caso não seja possível ter os projetos iguais, é aconselhável prever sempre a menor diferença entre as tensões de 3º harmônica onde as reatâncias de sequência zero não sejam tão baixas. Outra solução é utilizar reatores ou resistores para limitar essa corrente.

6. CONCLUSÃO

Ambos os passos de enrolamento possuem benefícios. A seleção correta para a aplicação é a que trará mais benefícios para o cliente.

O projetista sempre tentará otimizar a forma de onda do gerador para ter baixo THD e minimizar o custo, indiferente o passo utilizado. Um gerador bem projetado pode ter um THD baixo com qualquer passo.

A Tabela 1 apresenta as aplicações onde recomenda-se utilizar os passos de 2/3 e 5/6.

Tabela 1

	Passo 2/3	Passo 5/6
Cargas monofásicas não lineares	X	
Quantidade de material ativo menor na máquina		X
Corrente de falta fase-neutro menor		X
Operação de geradores em paralelo	X	
Sistemas trifásicos de baixa tensão de quatro fios	X	
Sistemas trifásicos de média e alta tensão		X
Facilidade de projeto de painéis elétricos	X	