



Características dos circuitos de ventilação aplicados a máquinas síncronas de polos lisos

Guilherme Schneider Porepp
WEG
Brasil
guilhermesp@weg.net

Resumo - O emprego do conceito de polos lisos, ou cilíndricos, em máquinas síncronas corresponde a uma solução que propicia excelentes condições de dissipação térmica dos enrolamentos do rotor e estator. O presente trabalho tem como finalidade descrever os principais arranjos de ventilação para esse conceito construtivo, bem como os principais fatores que determinam a escolha do método de ventilação mais adequado a cada aplicação.

1 INTRODUÇÃO

Máquinas síncronas de polos lisos caracterizam-se pelo fato de seu rotor não possuir polos de forma extraível da roda polar. Seus polos são construídos diretamente no rotor cilíndrico, fato que o denomina também de polos não salientes. O rotor de polos lisos apresenta canais radiais de ventilação, semelhante ao estator, característica que facilita a dissipação térmica no ferro e no enrolamento de campo. Tal vantagem mantém a temperatura do ferro do rotor mais homogênea ao longo do pacote de chapas, além de fazer das faces das chapas do ferro em contato com o ar, ampliações da área de troca térmica entre o enrolamento de campo e o ar de refrigeração. Entretanto, para que a refrigeração das fontes de calor se dê de forma homogênea, é fundamental o correto dimensionamento do circuito de ventilação da máquina. O cálculo deste tem como finalidade a geração da vazão de ar necessária à dissipação das perdas térmicas da máquina bem como a correta distribuição desta vazão de ar pela máquina visando um resfriamento equilibrado das fontes geradoras de calor. Em máquinas síncronas de polos lisos o resfriamento dos enrolamentos do rotor e do estator pode ser efetuado por meio de dois métodos de ventilação distintos: através de um circuito de ventilação unilateral, ou bilateral. Estes dois métodos são descritos nos tópicos subsequentes.

2 CIRCUITO DE VENTILAÇÃO UNILATERAL

O sistema de ventilação unilateral caracteriza-se pela existência de apenas uma região de entrada de ar e uma de saída de ar.

O arranjo típico de máquinas síncronas com tal sistema de ventilação apresenta um ventilador centrífugo de pás radiais retas ou curvadas para trás na região de saída de ar. Da forma com está inserido no circuito de ventilação, o ventilador centrífugo utiliza a região de baixa pressão gerada em sua entrada de ar para succionar o ar que escoo pela máquina elétrica.

2.1 REGIÕES DE ESCOAMENTO DE AR

Por meio da Figura 1, a qual ilustra o escoamento do ar desejado em um sistema de ventilação unilateral, evidencia-se que o escoamento do ar não se dá através de apenas um caminho, mas sim por meio de ramos paralelos.

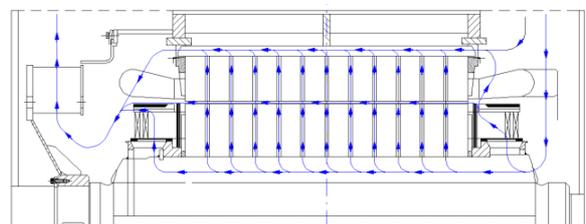


Figura 1: Ilustração das linhas de fluxo de ar em um circuito unilateral de polos lisos

O ajuste da vazão de ar em cada ramo de escoamento dá-se pela ponderação entre áreas de passagem de ar e pressões geradas pelo ventilador e canais radiais do pacote do rotor, além das próprias cabeças de bobina do rotor. O ramo principal de escoamento corresponde à passagem de ar através dos canais radiais do rotor, devido ao fato destes gerarem muito mais



pressão que as cabeças de bobina do rotor. Por apresentar grande porcentagem da vazão líquida de ar no ramo de escoamento pelos canais radiais do rotor e estator, cuidados especiais são tomados no dimensionamento das áreas de passagem de ar de quatro regiões do circuito unilateral, numeradas conforme Figura 2:

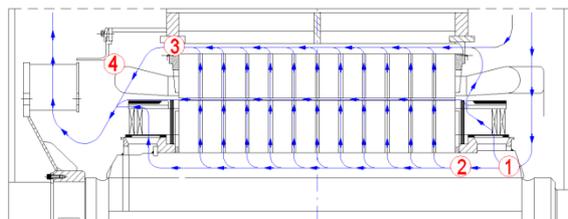


Figura 2: Principais áreas de passagem de ar do ramo principal de um circuito unilateral

Descrição das áreas de passagem de ar:

1. Área transversal de entrada de ar no rotor, compreendida pela região entre as costelas e o anel de prensar rotor;
2. Área transversal de entrada de ar axial no pacote do rotor, delimitada pela região entre costelas, abaixo do diâmetro interno da chapa do rotor;
3. Área de saída de ar do pacote do estator, também conhecido como *by-pass*;
4. Área de passagem de ar entre o defletor de ar e a cabeça de bobina no lado de saída de ar.

O dimensionamento incorreto de qualquer uma dessas áreas de passagem de ar pode acarretar em sérios comprometimentos ao sistema de ventilação, provocando a redução da vazão de ar líquida da máquina.

Em virtude desse fato, quando no dimensionamento do circuito de ventilação, deve-se sempre atentar para a busca de baixas resistências de perda de carga no ramo principal do circuito de ventilação. Além de evitar reduções indesejadas da vazão de ar, obtêm-se menores perdas de carga no circuito de ventilação, que resultam em uma necessidade de menores pressões geradas pelos ventiladores. Com isso, também se obtêm menores perdas por ventilação e menor nível de ruído gerado pela máquina. Na região de entrada de ar do rotor, as linhas de fluxo de ar indicam que a vazão de ar que passa pela área 1 é superior à vazão de ar que atravessa a área 2, devido à existência de uma ramificação entre essas duas áreas a qual direciona o ar para a cabeça de bobina do rotor. No intuito de evitar estrangulamentos no circuito de ar do rotor, é recomendado que a área 1 seja sempre superior à área 2, preferencialmente atendendo a relação com a razão entre as vazões de cada trecho, mostrada na Eq. 1:

$$\frac{A_1}{A_2} \geq \frac{Q_1}{Q_2} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

A: referente às áreas transversais de passagem de ar;

Q: referente às vazões de ar em cada trecho;

Índices 1 e 2: referência a cada trecho, conforme mostrado na Figura 2.

2.2 ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO TÉRMICA

A característica que os rotores de polos lisos apresentam de concentrar a maior parcela da vazão total líquida nos canais radiais é evidenciada ao se analisar a distribuição de temperatura ao longo do rotor. Com o auxílio da Figura 3, obtida por meio de software de cálculo térmico, observa-se que a temperatura média do cobre na região do pacote rotor é inferior às temperaturas das cabeças de bobina, justamente em virtude da maior vazão de ar destinada a essa região.

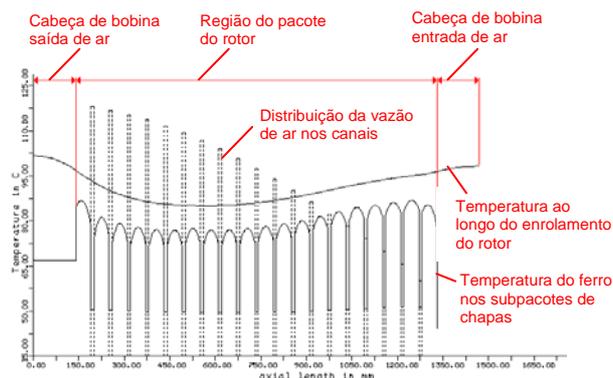


Figura 3: Distribuição de temperatura típica do rotor para circuitos de ventilação unilateral

Já no estator, ocorre uma situação diferente. Em geral, como não é utilizado defletor de ar próximo à cabeça de bobina de entrada de ar, esta é resfriada por uma grande vazão de ar à temperatura de entrada na máquina. Na cabeça de bobina do lado de saída do ar, a condição de resfriamento muda. Apesar de quase toda a vazão de ar interno da máquina passar pela cabeça de bobina do lado de saída, a temperatura com que esse ar a resfria já é cerca de 15 a 20 °C maior que na entrada. Dessa forma, tem-se geralmente uma distribuição de temperatura semelhante àquela mostrada na Figura 4, evidenciando o enrolamento do estator na região do pacote com temperatura superior à cabeça de bobina de entrada de ar, e ligeiramente inferior à cabeça de bobina de saída de ar.

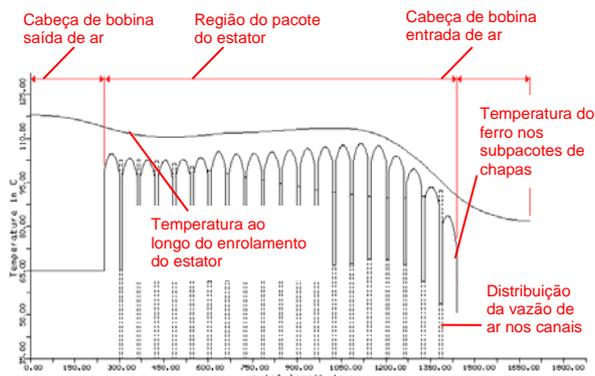


Figura 4: Distribuição de temperatura típica do estator para circuitos de ventilação unilateral

3 CIRCUITO DE VENTILAÇÃO BILATERAL

Neste sistema existem duas regiões de entrada de ar, nas partes dianteira e traseira da máquina, e uma de saída, na região do pacote do estator. Devido a esse fato, diz-se que há uma simetria do circuito de ventilação.

O arranjo típico desse sistema de ventilação em máquinas síncronas de polos lisos caracteriza-se pelo uso de ventiladores radiais fixados nos anéis de prender rotor. Nessa concepção de montagem, mostrada na Figura 5(a), os ventiladores radiais operam em paralelo com os canais radiais do rotor, tendo como única finalidade a geração de vazão de ar para o resfriamento das cabeças de bobina do estator.

Há ainda outro arranjo possível o qual consiste no uso de ventiladores axiais fixados ao eixo, acoplados em série com os canais radiais do rotor, conforme ilustra a Figura 5(b). Tal conceito tem por finalidade gerar um incremento de pressão na entrada de ar do pacote do rotor, beneficiando, assim, a geração de vazão de ar nos canais radiais. Apesar de poder ser utilizado nas mesmas aplicações dos ventiladores radiais, a vantagem mencionada faz com que o emprego de ventiladores axiais seja recomendado a casos em que os canais radiais do rotor não são capazes de gerar pressão suficiente para a provisão da vazão de ar necessária ao resfriamento da máquina. Têm-se como exemplo dessa aplicação, casos em que há necessidade do uso de chapas do rotor diretamente integradas ao eixo, sem o uso de costelas.

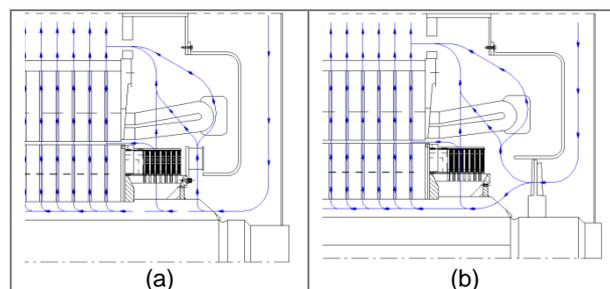


Figura 5: Ilustração das linhas de fluxo de ar em um circuito bilateral de polos lisos. (a) com ventiladores radiais; (b) com ventiladores axiais

3.1 REGIÕES DE ESCOAMENTO DE AR

O circuito de ventilação bilateral, assim como o unilateral, possui caminhos paralelos de escoamento de ar. A diferença reside no fato do sistema bilateral apresentar uma simetria de fluxo de ventilação, dada pelas duas regiões de entrada de ar. Essa vantagem proporciona uma melhor distribuição do fluxo de ar pela máquina. As proporções da vazão total que passam em cada ramo de escoamento são definidas conforme a necessidade de resfriamento das fontes de calor e reguladas por meio da relação entre as áreas de passagem de ar e as pressões geradas pelos canais radiais e ventiladores. As áreas de passagem de ar críticas para o circuito de ventilação bilateral, mostradas na Figura 6, correspondem a regiões limitantes para a magnitude das vazões de ar nos dois principais caminhos de escoamento, compreendidos pelos canais radiais do rotor e estator, e pela cabeça de bobina do estator.

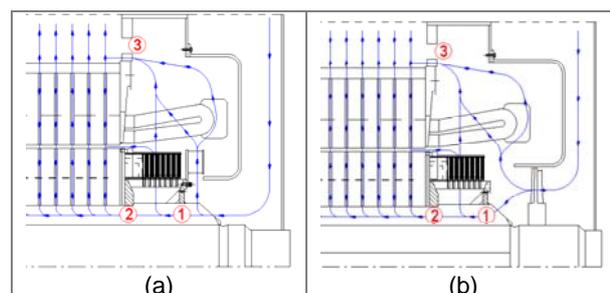


Figura 6: Principais áreas de passagem de ar dos ramos principais de um circuito bilateral. (a) com ventiladores radiais; (b) com ventiladores axiais

Descrição das áreas de passagem de ar:

1. Área de passagem de ar entre as costelas do eixo e anel de prender rotor;
2. Área transversal de entrada de ar do pacote do rotor;
3. Área de passagem de ar externa ao anel de prender estator (*by-pass*).



A região de entrada de ar do rotor no circuito bilateral apresenta a mesma característica mostrada no tópico 2.1, na qual se busca respeitar a relação entre os valores das áreas 1 e 2 e as vazões de ar que atravessam essas regiões, conforme foi apresentado na Eq. 1. A área de passagem de ar pelo by-pass (área 3), por pertencer a um trecho de escoamento de ar independente ao dos canais radiais do rotor, tem seu valor ajustado, por meio do cálculo térmico da máquina, de forma a se obter vazão de ar mínima requerida para o resfriamento das cabeças de bobina do estator.

3.2 ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO TÉRMICA

Em um circuito de ventilação bilateral adota-se uma abordagem de simetria na análise térmica, a qual é efetuada em metade da região ativa da máquina (compreendida do centro do pacote ao extremo de uma das cabeças de bobina). A Figura 7 apresenta uma distribuição térmica típica do rotor em um circuito de ventilação bilateral, tanto para o uso de ventiladores radiais quanto axiais. Por intermédio dela é evidenciada uma distribuição de temperaturas do enrolamento do rotor semelhante ao do circuito de ventilação unilateral, onde se tem temperaturas mais elevadas nas cabeças de bobina quando comparadas com a região do pacote de chapas. Esse fato ocorre, pois, apesar das cabeças de bobina do rotor apresentarem razoável geração de pressão, a perda de carga da saída de ar, no diâmetro externo, é bastante elevada, em virtude da necessidade do uso de bandagem ou capa de retenção as quais têm como função suportar a ação da força centrífuga da massa de cobre dessas regiões.

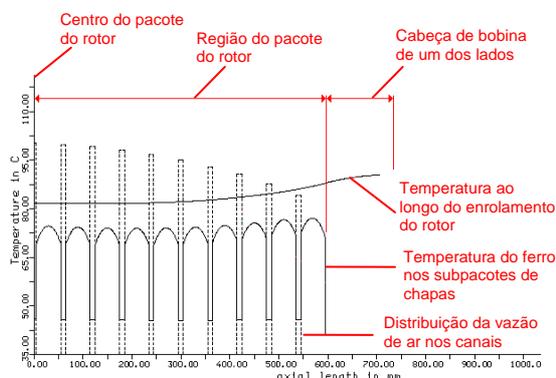


Figura 7: Distribuição de temperatura típica do rotor para circuitos de ventilação bilateral em metade da região ativa

Na região dos enrolamentos do estator, a distribuição térmica obtida é inversa ao rotor. Quando são utilizados ventiladores radiais, obtém-se maior vazão de ar na região das cabeças de bobina do estator.

Conseqüentemente, tem-se maior velocidade de escoamento do ar nesse trecho, o que favorece a transferência de calor. Dessa forma, conforme mostra a Figura 8, notam-se, nas cabeças de bobina, temperaturas inferiores ao enrolamento de cobre presente no pacote.

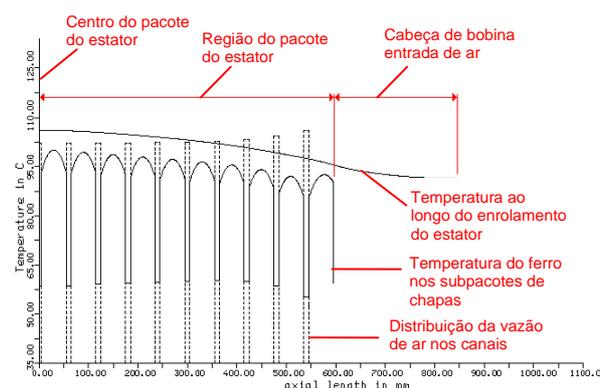


Figura 8: Distribuição de temperatura típica do estator para circuitos de ventilação bilateral, em metade da região ativa, com ventiladores radiais

Quando são empregados ventiladores axiais, ocorre uma tendência de maior homogeneidade na distribuição térmica no enrolamento do estator, conforme é ilustrado na Figura 9. Esse fato é explicado pela inexistência de ventiladores com dedicação exclusiva de resfriamento das cabeças de bobina. Os ventiladores axiais, como já comentado, tendem a otimizar a ventilação de maneira equilibrada entre os principais ramos de escoamento de ar. Sendo assim, quando se necessitam menores temperaturas nas cabeças de bobina do estator, faz-se necessário a ampliação da área de by-pass nas contra placas, representado pela região 3 da Figura 6, no intuito de reduzir a resistência de perda de carga nesse trecho de escoamento.

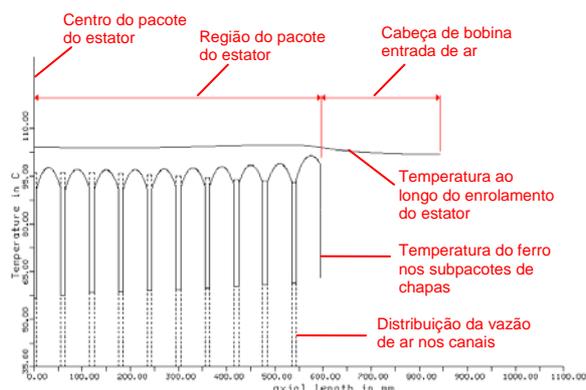


Figura 9: Distribuição de temperatura típica do estator para circuitos de ventilação bilateral, em metade da região ativa, com ventiladores axiais

4 ANÁLISE COMPARATIVA

Com base na descrição feita a respeito dos métodos de ventilação unilateral e bilateral, são obtidas características de desempenho e aplicação as quais permitem efetuar uma análise comparativa entre eles, elucidando os pontos fortes de cada conceito, conforme é mencionado nos tópicos subsequentes.

4.1 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO CIRCUITO DE VENTILAÇÃO UNILATERAL

- Permite a inclusão de volantes de inércia ou discos de freio dentro da carcaça, acoplados ao ventilador. Tal vantagem se justifica, pois a utilização de discos de freio na parte interna das máquinas só é permitida quando localizado em uma região de saída de ar, evitando assim, que o pó gerado na frenagem danifique a isolamento dos enrolamentos.
- Permite maior versatilidade do projeto térmico, em virtude da possibilidade de se obter diferentes valores de vazão de ar total apenas pela manipulação da geometria do ventilador.
- Quando não há solicitação de nível reduzido de ruído, é dispensado o uso de caixa de ventilação, devido ao fato de ser possível adotar aberturas laterais na região traseira, para a entrada de ar, e na região dianteira, para a saída de ar.

4.2 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO CIRCUITO DE VENTILAÇÃO BILATERAL

- Menor perda de carga do circuito de ventilação, devido à simetria do fluxo de ar a qual propicia o dobro de área de entrada de ar no rotor, em relação ao circuito unilateral.
- Menores perdas por ventilação. Essa vantagem é justificada pelo fato dos ventiladores utilizados no caso bilateral possuírem diâmetros menores que o ventilador radial empregado no sistema unilateral.
- Maior homogeneidade da distribuição térmica nos enrolamentos do rotor e estator, propiciada pela simetria do circuito de ventilação.
- Em geral essa configuração implica em níveis de ruído inferiores ao circuito unilateral, em virtude da utilização de ventiladores de menor diâmetro.

5 CONCLUSÃO

A análise conceitual dos circuitos de ventilação visou descrever o comportamento térmico típico de máquinas síncronas de polos lisos com canais radiais. Além disso, foram apresentadas precauções necessárias ao dimensionamento das áreas de passagem de ar principais, para cada circuito de ventilação.

A definição do conceito de ventilação a ser empregado em cada linha de produto depende fortemente da aplicação. Têm-se como exemplo, casos de grandes solicitações de inércia que requerem uso de volantes, correspondentes a situações típicas de hidrogeradores, onde se torna favorável a utilização do sistema de ventilação unilateral. Esta escolha permite o posicionamento do volante na parte interna da máquina, acoplado ao ventilador, na região de saída de ar. Tal arranjo permite um melhor comportamento rotordinâmico da máquina, pois coloca um componente de grande massa, no caso o volante, entre mancais.

Entretanto, de uma maneira geral é possível afirmar que, em situação onde não há requisitos técnicos específicos de alguma aplicação, o sistema de ventilação bilateral proporciona melhor desempenho térmico que o unilateral, pois propicia uma distribuição térmica mais homogênea nos enrolamentos do rotor e estator, além de apresentar maior eficiência de ventilação, caracterizada pela menor geração de perdas por ventilação. A opção entre o uso de ventiladores radiais ou axiais no sistema de ventilação bilateral dependerá da capacidade de geração de pressão



apresentada pelo rotor. Nos casos em que os canais radiais e as cabeças de bobina do rotor estiverem aptos a gerar pressão suficiente à provisão das vazões de ar requisitadas no projeto, é preferível o uso de ventiladores radiais. Como já mencionado, o uso desses ventiladores não tem o propósito de beneficiar a ventilação do rotor, mas sim das cabeças de bobina do estator. Em situações que o rotor não for capaz de gerar tal pressão requerida, torna-se vantajoso o uso de ventiladores axiais, visto que estes, estando acoplados em série com o rotor, irão adicionar pressão ao sistema, permitindo a obtenção das vazões de ar necessárias aos canais radiais e cabeças de bobina do rotor.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Trabalhos de Tecnologia WEG voltados à análise de Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos para Máquinas Elétricas Girantes.
- [2] Resultados de análises experimentais em Laboratório de Ensaios Térmicos.
- [3] Notas de consultoria em Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos aplicados a Máquinas Elétricas Girantes.