



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 1104889-1 B1

(22) Data do Depósito: 27/09/2011

(45) Data de Concessão: 19/01/2021



(54) Título: MÉTODO DE CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA SUPERALIMENTADO POR MEIO DE UM TURBOCOMPRESSOR

(51) Int.Cl.: F02B 37/18; F02B 77/08; F02D 23/00; F02D 41/00.

(30) Prioridade Unionista: 27/09/2010 IT BO2010A 000579.

(73) Titular(es): MAGNETI MARELLI S.P.A..

(72) Inventor(es): MARCO PANCIOLO.

(57) Resumo: MÉTODO DE CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA SUPERALIMENTADO POR MEIO DE UM TURBOCOMPRESSOR . Descreve-se um método para controlar um motor de combustão interna (1) superalimentado por meio de um turbocompressor (12) provido com uma turbina (13) e um compressor (14), o método de controle compreendendo as etapas de estabelecer uma velocidade limite pré-determinada do turbocompressor (12); calcular uma velocidade limite inferior reduzida do turbocompressor (12) e uma velocidade limite superior reduzida do turbocompressor (12), que são variáveis, dependendo da velocidade limite pré-determinada do turbocompressor (12) e da temperatura absoluta (T_o) a montante do compressor (14); determinar um intervalo de sobrevelocidade do turbocompressor (12), compreendido entre a velocidade limite inferior reduzida e a velocidade limite superior reduzida do turbocompressor (12); calcular uma velocidade limite reduzida atual; e controlar o turbocompressor (12) para abaixar a velocidade limite reduzida para um valor inferior ao da velocidade limite inferior reduzida, cada vez que um valor de uma velocidade limite reduzida atual compreendido dentro do intervalo de sobrevelocidade for detectado.

MÉTODO DE CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA SUPERALIMENTADO POR MEIO DE UM TURBOCOMPRESSOR

CAMPO TÉCNICO

[001] A presente invenção refere-se a um método para controlar um motor de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor.

ESTADO DA ARTE

[002] Como se sabe, alguns motores de combustão interna são providos com um sistema de superalimentação com turbocompressor, que pode aumentar a potência gerada pelo motor usando a entalpia dos gases de escape para comprimir o ar de admissão do motor e, portanto, aumentar a eficiência volumétrica de admissão.

[003] Um sistema de superalimentação com turbocompressor compreende um turbocompressor equipado com uma turbina, que fica disposto ao longo de um conduto de escape para girar em alta velocidade sob a pressão dos gases de escape expulsos pelo motor, e um compressor, que é posto em rotação pela turbina e fica disposto ao longo do conduto de alimentação de ar, comprimindo o ar de admissão do motor.

[004] Em um sistema de superalimentação com turbocompressor, é necessário manter a faixa de operação do turbocompressor dentro de uma área útil dependente do ponto do motor, tanto por razões funcionais (ou seja, para evitar avarias ou, ainda, baixo desempenho), e por razões estruturais (ou seja, para evitar danos ao turbocompressor).

[005] Em particular, a área útil da faixa de operação é limitada, no lado esquerdo de um gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão, pela linha de bombeamento e, no outro direito do mesmo gráfico, pela chamada "linha de saturação". A linha de bombeamento, portanto, define uma primeira "zona proibida", e consiste na localização dos pontos onde o equilíbrio aerodinâmico interno do compressor é interrompido, produzindo uma rejeição de fluxo periódica, ruidosa e violenta para a entrada, com efeitos que podem ser destrutivos para as palhetas.

[006] O pedido de patente EP 1741895A1 descreve um método de controle de um motor

de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor, compreendendo um compressor, uma turbina adaptada para acionar a rotação do compressor sob a ação dos gases de escape do motor, e uma válvula de descarga adaptada para regular o fluxo dos gases de escape providos como entrada para a turbina, para controlar a velocidade de rotação da própria turbina de acordo com uma pressão de saída de superalimentação visada, requerida pelo compressor. O método de controle descrito no pedido de patente EP 1741895A1 compreende as etapas de medir a pressão de ar de admissão que entra no compressor; determinar a taxa de fluxo de massa do compressor, calculando-se, através de um mapa pré-determinado que caracteriza o funcionamento do compressor, de acordo com a velocidade de rotação limite pré-estabelecida, a pressão do ar medida e do fluxo de massa, e a pressão limite de superalimentação, que está relacionada com a pressão de saída de ar obtida do compressor, quando a turbina gira a uma velocidade substancialmente igual à velocidade limite pré-estabelecida; verificar se uma pressão de superalimentação visada satisfaz uma relação pré-estabelecida com a pressão de superalimentação limite calculada, e no caso da relação ser atendida, atuar na válvula de descarga para controlar a velocidade de rotação da turbina de acordo com a pressão limite de superalimentação, reduzindo assim a velocidade de rotação do turbocompressor para um valor substancialmente igual à velocidade limite pré-estabelecida.

[007] O pedido de patente EP 2014894A1 descreve, ao invés, um método de controle de um motor de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor, equipado com uma turbina e um compressor que visa fornecer, em um gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão, pelo menos uma curva de limite de operação, pelo menos uma curva de interação de uma válvula de descarga que regula um conduto de derivação (bypass) da turbina, e pelo menos uma curva de intervenção de uma válvula Poff que regula o conduto de derivação do compressor. O método de controle de acordo com o pedido de patente EP 2014894A1 provê o uso da curva de limite de operação para limitar a pressão visada a jusante do compressor usado pelo controle do

motor. O método provê ainda o controle da abertura da válvula de descarga se a curva de intervenção da válvula de descarga for ultrapassada, e o controle da abertura da válvula Poff se a curva de intervenção da válvula Poff for ultrapassada. O método de controle descrito pelo documento EP 2014894A1 é capaz de garantir que a faixa de operação do turbocompressor permaneça dentro da área útil em qualquer condição de trabalho do motor de combustão interna.

[008] A chamada "linha de saturação", que define uma segunda "zona proibida" e corresponde a atingir condições sônicas (e conseqüente bloqueio do fluxo) na turbina, define o fluxo máximo possível que o compressor pode fornecer em determinadas condições do ambiente de admissão. Próximo da linha de saturação, o turbocompressor atinge velocidades muito altas e é capaz de desenvolver a potência máxima para comprimir a admissão de ar do motor, aumentando portanto a eficiência volumétrica da aspiração. Infelizmente, porém, próximo da linha de saturação, devido às altas velocidade envolvidas, pode ocorrer que o turbocompressor acelere fora de controle até atingir o bloco sônico, com efeitos destrutivos sobre o próprio turbocompressor.

[009] O documento JP 8200082 descreve, ao invés, um método de controle de um motor de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor, que provê a determinação de um intervalo de sobrevelocidade de operação do turbocompressor, compreendido entre uma velocidade limite inferior e uma velocidade limite superior, regulando-se o turbocompressor para retornar imediatamente a velocidade atual para um valor menor ou igual à velocidade limite inferior, cada vez em que o valor da velocidade atual detectado estiver dentro do intervalo de sobrevelocidade; em outras palavras, o método descrito no documento JP 8200082 inibe totalmente o funcionamento do motor dentro do intervalo de sobrevelocidade. O método acima descrito, no entanto, não permite otimizar o controle do motor de combustão interna superalimentado, na proximidade do intervalo de sobrevelocidade.

DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

[010] O objetivo da presente invenção é fornecer um método de controle de um motor de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor, o dito método de controle sendo de implementação simples e barata, e em particular permitindo garantir que a faixa de operação do turbocompressor permaneça dentro da área útil, próximo da linha de saturação, mas sem atingir o bloco sônico.

[011] De acordo com a presente invenção, é provido um método de controle de um motor de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor, tal como alegado pelas reivindicações anexas.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[012] A presente invenção será agora descrita com referência aos desenhos em anexo, que ilustram uma forma de incorporação não limitativa, em que:

- A figura 1 ilustra esquematicamente um motor de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor, equipado com uma unidade de controle eletrônico que implementa um método de controle executado de acordo com a presente invenção;
- A figura 2 ilustra as curvas características de um compressor do turbocompressor da figura 1, em um gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão; e
- As figuras 3 a 6 mostram um gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão, em que estão representadas as curvas de limite de operação e as curvas de intervenção utilizadas no método de controle implementado na unidade de controle eletrônico da figura 1.

FORMAS DE INCORPORAÇÃO PREFERIDAS DA INVENÇÃO

[013] Na figura 1, o número 1 indica como um todo um motor de combustão interna superalimentado por meio de um sistema de superalimentação com turbocompressor 2.

[014] O motor de combustão interna 1 tem quatro cilindros 3, cada um dos quais está conectado a um coletor de admissão 4, por meio de pelo menos uma respectiva válvula de admissão (não mostrada), e a um coletor de escape 5, por meio de pelo menos uma respectiva válvula de escape (não mostrada). O coletor de admissão 4 recebe ar fresco

(ou seja, ar proveniente do ambiente externo) através de um conduto de admissão 6, que é provido com um filtro de ar 7 e é regulado por uma válvula do acelerador 8. Ao longo do conduto de admissão 6 é provido um intercooler (resfriador intermediário) 9, cuja função é resfriar o ar de admissão. Ao coletor de escape 5 está conectado um conduto de escape 10, que alimenta os gases de escape produzidos pela combustão a um sistema de exaustão, que emite os gases produzidos pela queima na atmosfera e compreende, geralmente, pelo menos um catalisador 11 e pelo menos um silenciador (não mostrado) disposto a jusante do catalisador 11.

[015] O sistema de superalimentação 2 do motor de combustão interna 1 compreende um turbocompressor 12 equipado com uma turbina 13, que fica disposta ao longo do conduto de escape 10, para girar em alta velocidade sob a ação dos gases de escape expulsos dos cilindros 3, e um compressor 14, que fica disposto ao longo do conduto de admissão 6 e está ligado mecanicamente à turbina 13, para ser acionado em rotação pela própria turbina 13, de modo a aumentar a pressão do ar alimentado no conduto de admissão 6.

[016] Ao longo do conduto de escape 10 é provido um conduto de derivação 15, que está conectado em paralelo com a turbina 13, de forma a apresentar suas extremidades conectadas a montante e a jusante da turbina 13. Ao longo do conduto de derivação 15 está disposta uma válvula de descarga 16, que é adaptada para regular o fluxo de gases de escape que passam através do conduto de derivação 15 e é acionada por um atuador 17. Ao longo do conduto de escape 10 é provido um conduto de derivação 18, que está conectado em paralelo com o compressor 14, de modo a apresentar suas extremidades conectadas a montante e a jusante do compressor 14. Ao longo do conduto de derivação 18 está disposta uma válvula Poff 19, que é adaptada para regular o fluxo de gases de escape que passam através do conduto de derivação 18 e é acionada por um atuador 20.

[017] O motor de combustão interna 1 é controlado por uma unidade de controle eletrônico 21, que dirige a operação de todos os componentes do motor de combustão

interna 1, incluindo o sistema de superalimentação 2. Em particular, a unidade de controle eletrônico 21 aciona os atuadores de controle 17 e 20 da válvula de descarga 16 e da válvula Poff 19. A unidade de controle eletrônico 21 está conectada a sensores 22 que medem a temperatura T_o e a pressão P_o ao longo do conduto de admissão 6, a montante do compressor 14, a sensores 23 que medem a temperatura e pressão ao longo do conduto de admissão 6 a montante da válvula do acelerador 8, e a sensores 24 que medem a temperatura e a pressão dentro do coletor de admissão 4. Além disso, a unidade de controle eletrônico 21 está conectada a um sensor 25, que mede a posição angular (e portanto a velocidade de rotação) de um virabrequim do motor de combustão interna 1, e a um sensor 26 que mede a fase da admissão e/ou das válvulas descarga. Também é importante ressaltar que não há sensores providos adaptados para medir a velocidade de rotação do turbocompressor 12.

[018] Entre outras coisas, a unidade de controle eletrônico 21 mantém a faixa de operação do turbocompressor 12 dentro de uma área útil. A descrição abaixo mostra o modo de controle utilizado pela unidade de controle eletrônico 21 para manter a faixa de operação do turbocompressor 12 em uma área útil, e para evitar que o turbocompressor 12 atinja condições sônicas na proximidade de uma linha de saturação 35 (ilustrada nas figuras 4 e 5).

[019] Durante a fase de projeto e desenvolvimento do motor de combustão interna 1, as curvas características do compressor 14 (providas pelo fabricante do turbocompressor 12) são analisadas em um gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão. Um exemplo das curvas características de um compressor 14 comercial está ilustrado na figura 2.

[020] As curvas características mostradas na figura 2 são normalizadas para uma temperatura de referência absoluta T_{o_rif} e uma pressão de referência absoluta P_{o_rif} . No lado esquerdo do gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão está uma primeira zona proibida delimitada pela linha de bombeamento, consistindo na

localização dos pontos onde o equilíbrio aerodinâmico dentro do compressor 14 é interrompido e há uma rejeição de fluxo periódica, barulhenta e violenta na entrada, com efeitos que podem ser destrutivos para as palhetas.

[021] Em vez disso, no lado direito do gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão existe uma segunda zona proibida delimitada pela chamada linha de saturação 35 (mostrada nas figuras 4 e 5), que corresponde à ocorrência de condições sônicas (bloqueando, assim, o fluxo) na entrada da turbina 13, e define o fluxo máximo possível que o compressor 14 pode fornecer em determinadas condições do ambiente de admissão.

[022] De acordo com o mostrado na figura 3, através de uma análise das curvas características do compressor 14 uma curva 27 é determinada, limitando a velocidade de rotação do turbocompressor 12, assim como uma curva 28, que delimita o bombeamento do turbocompressor 12. De acordo com as curvas 27 e 28, duas curvas de limite de operação 29 e 30 são estabelecidas, sendo usadas para restringir a pressão visada a jusante do compressor 14, usada pelo controle do motor. Para determinar a curva de limite de operação 29 um limiar S1 (constante ou variável) é determinado, estabelecendo a distância entre a curva de limite de operação 29 e a curva 27, que limita a velocidade de rotação do turbocompressor 12; similarmente, para determinar a curva de limite de operação 30 um limiar S2 (constante ou variável) é determinado, estabelecendo a distância entre a curva de limite de operação 30 e a curva 28, que delimita o bombeamento do turbocompressor 12.

[023] Além disso, de acordo com as curvas 27 e 28, são estabelecidas duas curvas de intervenção 31 e 32 para a válvula de descarga 16, que regula o conduto de derivação 15 da turbina 13, e duas curvas de intervenção 33 e 34 da válvula Poff 19, que regula o conduto de derivação 18 do compressor 14. Para determinar a curva de intervenção 31 da válvula de descarga 16 um limiar S3 (constante ou variável) é determinado, estabelecendo a distância entre a curva de limite de operação 29 e a curva de intervenção 31 da válvula

de descarga 16; similarmente, para determinar a curva de intervenção 32 da válvula de descarga 16 um limiar S4 (constante ou variável) é determinado, estabelecendo a distância entre a curva de intervenção 32 da válvula de descarga 16 e a curva 28, que delimita o bombeamento do turbocompressor 12. Para determinar a curva de intervenção 33 da válvula Poff 19 um limiar S5 (constante ou variável) é determinado, estabelecendo a distância entre a curva de limite de operação 29 e a curva de intervenção 33 da válvula Poff 19; similarmente, para determinar a curva de intervenção 34 da válvula Poff 19 um limiar S6 (constante ou variável) é determinado, estabelecendo a distância entre a curva de intervenção 34 da válvula Poff 19 e a curva 28, que delimita o bombeamento do turbocompressor 12.

[024] Durante o funcionamento do motor de combustão interna 1, a unidade de controle eletrônico 21 utiliza as curvas de limite de operação 29 e 30 para limitar a pressão visada a jusante do compressor 14, usada pelo controle do motor. Em outras palavras, a unidade de controle do motor implementada na unidade de controle eletrônico 21 determina de uma forma conhecida, e em função do ponto de motor, uma pressão visada a jusante do compressor 14, que representa um valor ótimo e desejado da pressão a jusante do compressor 14. Se a pressão visada a jusante do compressor 14 for compatível com as curvas de limite operacional 29 e 30, então a pressão visada a jusante do compressor 14 é mantida, caso contrário, se a pressão visada a jusante do compressor 14 não for compatível com as curvas de limite de operação 29 e 30, então a pressão visada a jusante do compressor 14 é limitada para um valor máximo, compatível com as curvas de limite de operação 29 e 30.

[025] Em particular, para limitar a pressão visada a jusante do compressor 14, a taxa de fluxo de massa reduzida QAH do compressor 14 é determinada, e de acordo com a taxa de fluxo de massa reduzida QAH do compressor 14, a máxima taxa de compressão RC possível é determinada pelo uso das curvas de limite de operação 29 e 30; a máxima pressão possível é determinada a jusante do compressor 14 multiplicando-se a pressão

absoluta P_o , a montante do compressor 14, pela máxima taxa de compressão RC possível, e a pressão visada a jusante do compressor 14 fica limitada à máxima pressão possível a jusante do compressor 14, se a pressão visada a jusante do compressor 14 for maior do que a pressão máxima possível a jusante do compressor 14.

[026] A taxa de fluxo de massa reduzida Q_{AHR} do compressor 14 é determinada usando-se a seguinte equação:

Equação 1

$$Q_{AHR} = Q_{AH} \cdot \sqrt{\frac{T_o}{T_{orif}}} \cdot \frac{P_{orif}}{P_o}$$

Q_{AH} = taxa de fluxo de massa do compressor 14;

Q_{AHR} = taxa de fluxo de massa reduzida do compressor 14;

T_o = temperatura absoluta a montante do compressor 14;

P_o = pressão absoluta a montante do compressor 14;

T_{orif} = temperatura de referência absoluta;

P_{orif} = pressão de referência absoluta.

[027] A temperatura de referência absoluta T_{orif} e a pressão de referência absoluta P_{orif} são as condições nas quais foram derivadas as curvas características do compressor 14 e, portanto, as curvas 27 a 34, e são dados de projeto conhecidos antecipadamente. A temperatura absoluta T_o a montante do compressor 14 e a pressão absoluta P_o a montante do compressor 14 são medidas pelos sensores 22. A taxa de fluxo de massa Q_{AH} do compressor 14 pode ser medida por um sensor de vazão especificamente dedicado, ou pode ser estimada, em um modo conhecido, pela unidade de controle eletrônico 21.

[028] De acordo com uma forma de incorporação diferente, não ilustrada, a medição da temperatura absoluta T_o a montante do compressor 14 (isto é, substancialmente a temperatura ambiente) pode não estar disponível; neste caso a taxa de fluxo de massa reduzida Q_{AHR} pode ser "parcialmente" normalizada com base a relação entre a pressão

Po/Po_rif sem levar em conta a relação entre as temperaturas To e To_rif.

[029] É importante sublinhar que as curvas 28, 30, 32 e 34 são independentes da velocidade limite reduzida NtcR do turbocompressor 12, enquanto que as curvas 27, 29, 31 e 33 são dependentes da velocidade limite reduzida NtcR do turbocompressor 12 (ou seja, variam com a variação da velocidade limite reduzida NtcR do turbocompressor 12). Em outras palavras, é definida uma velocidade limite Ntc pré-definida para o turbocompressor 12, acima da qual o turbocompressor 12 é posto em uma condição crítica; usando-se a velocidade limite pré-definida NtcR do turbocompressor 12, a velocidade limite reduzida atual NtcR do turbocompressor 12 é calculada com base na temperatura absoluta To a montante do compressor 14, através da seguinte equação:

Equação 2

$$N_{tcR} = N_{tc} \cdot \sqrt{\frac{T_{orif}}{T_o}}$$

Ntc = velocidade limite do turbocompressor 12;

NtcR = velocidade limite reduzida do turbocompressor 12;

To = temperatura absoluta a montante do compressor 14;

To_rif = temperatura de referência absoluta.

[030] Conforme varia a temperatura absoluta To a montante do compressor 14 e na mesma velocidade limite pré-determinada Ntc do turbocompressor 12, varia também a velocidade limite atual reduzida NtcR do turbocompressor 12; portanto, a unidade de controle eletrônico 21 determina ciclicamente, de acordo com a temperatura absoluta To a montante do compressor 14 e de acordo com a velocidade limite pré-determinada Ntc do turbocompressor 12 (que permanece sempre constante), a velocidade limite atual reduzida NtcR do turbocompressor 12, e de acordo com a velocidade limite atual reduzida NtcR do turbocompressor 12 ela é capaz de determinar as curvas 27, 29, 31 e 33 a serem usadas. Alternativamente, uma vez que a velocidade limite pré-determinada Ntc do turbocompressor 12 é constante, para simplificar o gerenciamento das curvas 27, 29, 31 e

33, as curvas 27, 29, 31 e 33 podem ficar armazenadas na unidade de controle eletrônico 21 e parametrizadas de acordo com a temperatura absoluta T_o a montante do compressor 14; desta forma, a unidade de controle eletrônico 21 não precisa calcular a velocidade limite reduzida atual N_{tcR} do turbocompressor 12 e, portanto, escolher as curvas 27, 29, 31 e 33 a serem usadas, mas simplesmente precisa atualizar as curvas 27, 29, 31 e 33 em função da temperatura absoluta T_o a montante do compressor 14.

[031] De acordo com uma outra forma de incorporação simplificada (e, portanto, menos precisa), em vez de usar a taxa de fluxo de massa reduzida atual Q_{AHR} , poderia ser usada a taxa de fluxo de massa atual Q_{AH} (não reduzida), ou a taxa de fluxo de massa visada Q_{AHR} (reduzida ou não reduzida).

[032] Uma vez determinada a velocidade limite reduzida atual N_{tcR} , a unidade de controle eletrônico 21 está preparada para determinar um limiar crítico $M_{critica}$ da taxa de fluxo de massa reduzida Q_{AHR} . Como melhor ilustrado na figura 4, o dito limiar crítico $M_{critica}$ delimita no gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão uma parte da área útil da faixa de operação do turbocompressor 12, a qual será doravante referida como área crítica, e enquanto permanecer dentro da área útil ela representa a área próxima à ocorrência de condições sônicas (ou seja, próximo à linha de saturação 35). A zona crítica é caracterizada pelo colapso da eficiência do compressor 14, e por uma elevada instabilidade da velocidade do turbocompressor 12, que pode acelerar perigosamente.

[033] O limiar crítico $M_{critica}$ é variável, dependendo da velocidade limite reduzida N_{tcR} (conforme melhor ilustrado na figura 5).

[034] Para reduzir a instabilidade que caracteriza a zona crítica, a unidade de controle eletrônico 21 é configurada para filtrar a taxa de fluxo de massa reduzida atual Q_{AHR} usada para limitar a pressão visada a jusante do compressor 14. Da mesma forma, a unidade de controle eletrônico 21 é configurada para filtrar pressão visada a jusante do compressor 14. A capacidade de filtragem da taxa de fluxo de massa reduzida atual Q_{AHR}

usada para limitar a pressão visada a jusante do compressor 14, e a pressão visada a jusante do compressor 14, são capazes de reduzir a dinâmica das variáveis acima mencionadas. De acordo com uma variante preferida, a filtragem é conseguida através de um filtro passa baixa de primeiro grau.

[035] No caso da taxa de fluxo de massa reduzida QAHR exceder o limiar crítico $M_{critica}$, a unidade de controle 21 fica então preparada para filtragem, com um filtro passa baixa do tipo de primeiro grau, tanto da taxa de fluxo de massa reduzida atual QAHR como da pressão visada a jusante do compressor 14.

[036] De acordo com uma variante preferida, a unidade de controle é configurada para determinar um limiar de segurança M_{max_turbo} da taxa de fluxo de massa reduzida QAHR. Como melhor ilustrado na figura 4, o limiar de segurança M_{max_turbo} delimita uma parte que evita a área crítica, uma vez que está mais próximo de atingir condições sônicas (ou seja, mais próximo da linha de saturação 35) e representa uma taxa de fluxo de massa reduzida QAHR além da qual o turbocompressor 12 não deve ir.

[037] O limiar de segurança M_{max_turbo} é maior do que o $M_{critica}$ limiar crítico. Além disso, o limiar de segurança M_{max_turbo} varia, dependendo da velocidade limite reduzida N_{tcR} (como melhor ilustrado na figura 5).

[038] A unidade de controle eletrônico 21 é configurada para impor que a taxa de fluxo de massa reduzida QAHR do compressor 14 seja inferior ao limiar de segurança M_{max_turbo} da taxa de fluxo de massa reduzida QAHR.

[039] De acordo com mais uma variante, a unidade de controle eletrônico 21 é configurada para determinar um limiar de segurança N_{max_turbo} da velocidade do motor de combustão interna superalimentado 1. O limiar de segurança N_{max_turbo} da velocidade do motor de combustão interna superalimentado 1 é, por sua vez, determinado em função do limiar de segurança M_{max_turbo} da taxa de fluxo de massa reduzida QAHR.

[040] Em particular, o limiar de segurança N_{max_turbo} da velocidade do motor de combustão interna superalimentado 1 é calculado usando-se a seguinte equação:

Equação 3

$$N_{\max_turbo} = M_{\max_turbo} \cdot \sqrt{\frac{T_{o_rif}}{T_o}} \cdot \frac{P_o}{P_{o_rif}} \cdot \frac{1}{(m \cdot 30 \cdot N_{cil})}$$

Onde:

Nmax_turbo = limiar de segurança da velocidade do motor de combustão interna superalimentado 1;

Mmax_turbo = limiar de segurança da taxa de fluxo de massa reduzida atual Q_{AHR};

To = temperatura absoluta a montante do compressor 14;

Po = pressão absoluta a montante do compressor 14;

To_rif = temperatura de referência absoluta;

Po_rif = pressão de referência absoluta;

Ncil = número de cilindros 3 do motor de combustão interna 1;

m = massa de ar aspirado para cada cilindro 3 do motor de combustão interna 1.

[041] O limiar de segurança Nmax_turbo é usado para limitar a velocidade do motor de combustão interna superalimentado 1, de modo que a taxa de fluxo de massa reduzida atual Q_{AHR} é inferior ao limiar Mmax_turbo.

[042] De acordo com uma variante preferida, para o turbocompressor 12 uma velocidade limite pré-estabelecida N_{tc} do turbocompressor 12 fica acima daquela onde o turbocompressor 12 fica em uma condição crítica; usando-se a velocidade limite pré-estabelecida N_{tc} do turbocompressor 12, a velocidade limite reduzida atual N_{tcR} do turbocompressor 12 é calculada com base na temperatura absoluta To a montante do compressor 14, através da seguinte equação:

Equação 4

$$N_{tcR} = N_{tc} \cdot \sqrt{\frac{T_{orif}}{T_o}}$$

N_{tc} = velocidade limite do turbocompressor 12;

N_{tcR} = velocidade limite reduzida do turbocompressor 12;

To = temperatura absoluta a montante do compressor 14;

To_rif = temperatura de referência absoluta.

[043] Com a variação de temperatura absoluta To a montante do compressor 14 e na mesma velocidade limite pré-estabelecida Ntc do turbocompressor 12, também varia a velocidade limite reduzida atual NtcR do turbocompressor 12; portanto, a unidade de controle eletrônico 21 determina ciclicamente, de acordo com a temperatura absoluta To a montante do compressor 14 e de acordo com a velocidade limite pré-estabelecida Ntc do turbocompressor 12 (que permanece sempre constante), a velocidade limite reduzida atual NtcR do turbocompressor 12, e de acordo com a velocidade limite reduzida atual NtcR do turbocompressor 12 ela é capaz de determinar as curvas 27, 29, 31 e 33 a serem usadas. Alternativamente, uma vez que a velocidade limite pré-estabelecida Ntc do turbocompressor 12 é constante, para simplificar o gerenciamento das curvas 27, 29, 31 e 33, as curvas 27, 29, 31 e 33 podem ficar armazenadas na unidade de controle eletrônico 21 e parametrizadas de acordo com a temperatura absoluta To a montante do compressor 14; desta forma, a unidade de controle eletrônico 21 não precisa calcular a velocidade limite reduzida atual NtcR do turbocompressor 12 e, portanto, escolher as curvas 27, 29, 31 e 33 a serem usadas, mas simplesmente precisa atualizar as curvas 27, 29, 31 e 33 em função da temperatura absoluta To a montante do compressor 14.

[044] De acordo com o que foi descrito acima, e conforme mostrado na figura 5, a velocidade limite reduzida atual NtcR varia dependendo de vários fatores, em particular da temperatura absoluta To a montante do compressor 14.

[045] De acordo com uma variante preferida, em uma fase preliminar de definição e ajuste, uma velocidade limite inferior do turbocompressor 12 e uma velocidade limite superior do turbocompressor 12 são pré-definidas (que representam limites do turbocompressor 12, além dos quais não se deve ir, para que não haja quebra ou danos graves do próprio turbocompressor 12). Na prática, esses dois valores são usados para calcular a velocidade limite inferior reduzida Nrid_inf do turbocompressor 12 (que é

calculada usando-se a fórmula descrita acima, e varia de acordo com a velocidade limite inferior pré-estabelecida para o turbocompressor 12 e com a temperatura absoluta T_o a montante do compressor 14) e uma velocidade limite superior reduzida N_{rid_sup} do turbocompressor 12 (que também é calculado pela fórmula descrita acima, sendo maior do que a velocidade limite inferior reduzida do turbocompressor 12, e varia de acordo com a velocidade limite pré-definida para o turbocompressor 12 e com a temperatura absoluta T_o a montante do compressor 14). A velocidade limite inferior reduzida N_{rid_inf} do turbocompressor 12 e a velocidade limite superior reduzida N_{rid_sup} do turbocompressor 12 delimitam uma área de sobrevelocidade no gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão. Durante o tempo de vida do turbocompressor 12, é frequente o caso em que a área de sobrevelocidade se move no gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão (por exemplo, devido à influência da temperatura absoluta T_o a montante do compressor 14). Na prática, uma vez calculada a velocidade limite reduzida atual, a unidade de controle eletrônico 21 é configurada para controlar o turbocompressor 12 e abaixar a velocidade limite reduzida para um valor inferior ao da velocidade limite inferior reduzida N_{rid_inf} , cada vez que um valor da velocidade limite reduzida atual compreendido dentro do intervalo de sobrevelocidade for detectado.

[046] Em particular, um primeiro valor de limiar SOV_1 é estabelecido em uma fase preliminar de definição e ajuste, e o turbocompressor 12 é controlado para abaixar a velocidade limite reduzida para um valor inferior à velocidade limite inferior reduzida N_{rid_inf} , uma vez que um intervalo de tempo igual ao primeiro valor de limiar SOV_1 tenha decorrido, a partir do momento em que um valor da velocidade limite reduzida atual compreendido dentro do intervalo de sobrevelocidade (como mostrado na figura 6) foi detectado. Em outras palavras, quando a unidade de controle eletrônico 21 detecta uma velocidade limite reduzida atual dentro do intervalo de sobrevelocidade, um temporizador é inicializado para reportar a velocidade limite reduzida para um valor inferior ao da velocidade limite inferior reduzida N_{rid_inf} , uma vez que um intervalo de tempo igual ao

primeiro valor de limiar SOV_1 tenha decorrido (isto ocorrendo preferencialmente de maneira gradual e suave).

[047] De acordo com uma variante preferida, um segundo valor de limiar SOV_2 é estabelecido em uma fase preliminar de definição e ajuste. A unidade de controle eletrônico 21 é configurada para inicializar um temporizador cada vez que a velocidade limite reduzida diminuir abaixo da velocidade limite inferior reduzida Nrid_inferior, e inibe o funcionamento do turbocompressor 12 dentro da região de sobrevelocidade durante um intervalo de tempo igual ao do segundo valor de limiar SOV_2.

[048] O primeiro valor de limiar SOV_1 e o segundo valor de limiar SOV_2 são variáveis de acordo com o estado de envelhecimento e desgaste do turbocompressor 12.

[049] De acordo com uma variante preferida, a unidade de controle 21 é capaz de armazenar o tempo total gasto dentro da área de sobrevelocidade, e inibir o funcionamento do turbocompressor 12 na área de sobrevelocidade durante o restante da vida útil do turbocompressor 12, uma vez que o tempo total é igual a um valor limite de segurança (determinado em uma etapa preliminar de definição e ajuste).

[050] Além disso, de acordo com uma variante preferida, a unidade de controle 21 é adaptada para inibir o funcionamento do turbocompressor 12 na área de sobrevelocidade, quando a taxa de fluxo de massa reduzida QAHR estiver acima do limiar crítico Mcritica.

[051] De acordo com uma forma de incorporação preferida, o limiar SOV_2 pode variar de acordo com a frequência da sobrevelocidade mais recente. Em outras palavras, o limiar SOV_2 é maior quanto mais frequentemente uma velocidade limite reduzida atual for detectada dentro da faixa de sobrevelocidade. O limiar SOV_2 pode ser calculado, por exemplo, da seguinte forma:

Equação 5

$$S_{OV_2} = f\left(\left(\sum t_{Sobrevelocidade} - S_{OV_3} \right) / \text{temporizador} \right)$$

[052] Onde SOV_3 é um operador de diminuição (por exemplo, K*temporizador, com K representando um coeficiente pré-determinado), enquanto que a soma do tempo gasto

dentro do intervalo de sobrevelocidade e o temporizador são inicializados em cada sessão de uso do motor de combustão interna superalimentado 1 (ou seja, tipicamente para cada ciclo de partida/parada do motor de combustão interna superalimentado 1), e o temporizador é iniciado na primeira ocorrência de sobrevelocidade. A função é, preferencialmente, crescente.

[053] De acordo com mais uma forma de incorporação, para cada sessão de uso do motor de combustão interna superalimentado 1 (ou seja, para cada ciclo de partida/parada do motor de combustão interna superalimentado 1), logo que a unidade de controle 21 verificar a condição de operação dentro da área de sobrevelocidade, um contador C do tempo gasto em sobrevelocidade é inicializado. O contador C pode ser calculado usando-se a seguinte fórmula:

Equação 6

$$C = k1 * \sum_{\text{sobrevelocidade}} t - k2 * \sum_{\text{NÃO sobrevelocidade}} t$$

[054] Onde k1 e k2 são coeficientes pré-determinados em uma fase preliminar, enquanto que a soma do tempo gasto dentro do intervalo de sobrevelocidade e a soma de tempo gasto fora da área de sobrevelocidade são inicializados a cada sessão de uso do motor de combustão interna superalimentado 1.

[055] De acordo com uma variante preferida, em uma fase preliminar de definição e ajuste um quarto valor de limiar SOV_4 é estabelecido, o qual é comparado com o contador C do tempo gasto em sobrevelocidade. No caso do contador C ser igual ou superior ao quarto valor de limiar SOV_4, a unidade de controle 21 é configurada para inibir o funcionamento do turbocompressor 12 dentro da área de sobrevelocidade. Ao contrário, no caso do contador C ser inferior ao quarto valor de limiar SOV_4, a unidade de controle 21 é configurada para permitir a operação do turbocompressor 12 dentro da área de sobrevelocidade (de preferência com a ajuda de um operador de histerese).

[056] De acordo com uma variante, a unidade de controle 21 utiliza a pressão atual do turbocompressor 12, em vez da velocidade limite reduzida atual para reconhecer a

operação atual na área de sobrevelocidade.

[057] O método de controle descrito acima tem muitas vantagens, uma vez que é de implementação simples e de baixo custo, sem o uso de uma alta capacidade de computação na unidade de controle eletrônico 21, e sem exigir a instalação de componentes adicionais (em especial, sensores ou atuadores) em relação aos já presentes em um motor de combustão interna moderno. Além disso, o método de controle descrito acima é particularmente eficaz para evitar que a faixa de operação do turbocompressor 12 permaneça dentro da área útil próximo da linha de saturação, mas sem atingir o bloco sônico.

Reivindicações

1. Método de controle de velocidade de um motor de combustão interna superalimentado por meio de um turbocompressor, em um motor de combustão interna (1) superalimentado por meio de um turbocompressor (12) provido com uma turbina (13) e um compressor (14), o método de controle compreendendo as etapas de:

- estabelecer uma velocidade limite inferior pré-determinada do turbocompressor (12) e uma velocidade limite superior pré-determinada do turbocompressor (12);

- calcular uma velocidade limite inferior reduzida (N_{rid_inf}) do turbocompressor (12), de acordo com a velocidade limite inferior pré-determinada do turbocompressor (12) e com a temperatura absoluta (T_o) a montante do compressor (14);

- calcular uma velocidade limite superior reduzida (N_{rid_sup}) do turbocompressor (12), de acordo com a velocidade limite superior pré-determinada do turbocompressor (12) e com a temperatura absoluta (T_o) a montante do compressor (14); a velocidade limite superior reduzida (N_{rid_sup}) do turbocompressor (12) sendo maior do que a velocidade limite inferior reduzida (N_{rid_inf}) do turbocompressor (12);

- determinar um intervalo de sobrevelocidade do turbocompressor (12), compreendido entre a velocidade limite inferior reduzida (N_{rid_inf}) e a velocidade limite superior reduzida (N_{rid_sup}) do turbocompressor (12);

- calcular uma velocidade limite reduzida atual; e

- controlar o turbocompressor (12) de modo a abaixar a velocidade limite reduzida de volta para um valor inferior ou igual ao da velocidade limite inferior reduzida (N_{rid_inf}), cada vez que um valor da velocidade limite reduzida atual, compreendido dentro do intervalo de sobrevelocidade, for detectado;

o método de controle sendo **caracterizado por** compreender as etapas adicionais de:

- estabelecer, em uma fase preliminar de definição e ajuste, um

primeiro valor de limiar (S_{OV_1}); e

- controlar o turbocompressor (12) de modo a abaixar a velocidade limite reduzida de volta para um valor inferior ou igual ao da velocidade limite inferior reduzida (N_{rid_inf}), após um intervalo de tempo que é igual ao primeiro valor de limiar (S_{OV_1}) ter decorrido, a partir do momento em que um valor da velocidade limite reduzida atual, compreendido dentro do intervalo de sobrevelocidade, for detectado.

2. Método de controle de velocidade, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** compreender as etapas adicionais de:

- estabelecer, em uma fase de definição e ajuste preliminar, um segundo valor de limiar (S_{OV_2});
- depois que um intervalo de tempo igual ao primeiro valor de limiar (S_{OV_1}) decorreu, dentro do intervalo de sobrevelocidade, inibir a operação do turbocompressor (12) dentro da área de sobrevelocidade, durante um intervalo de tempo igual ao segundo valor de limiar (S_{OV_2}).

3. Método de controle de velocidade, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **caracterizado por** o primeiro valor de limiar (S_{OV_1}) e/ou o segundo valor de limiar (S_{OV_2}) poderem variar de acordo com a vida e o estado de desgaste do turbocompressor (12).

4. Método de controle de velocidade, de acordo com a reivindicação 2 ou 3, **caracterizado por** quanto mais frequentemente uma velocidade limite reduzida atual compreendida dentro do intervalo de sobrevelocidade for detectada, maior será o segundo valor de limiar (S_{OV_2}).

5. Método de controle de velocidade, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, **caracterizado por** compreender as etapas adicionais de:

- determinar a taxa de fluxo de massa reduzida atual (Q_{AHR}) do compressor (14);
- determinar um limiar crítico ($M_{critica}$) da taxa de fluxo de massa

reduzida (Q_{AHR}), o dito limiar crítico ($M_{critica}$) delimitando, em um gráfico de taxa de fluxo de massa reduzida/razão de compressão, uma área crítica próxima à da área de ocorrência de condições sônicas; e

- inibir a operação do turbocompressor (12) dentro da área de sobrevelocidade, quando a taxa de fluxo de massa reduzida atual (Q_{AHR}) for maior do que o limiar crítico ($M_{critica}$) da taxa de fluxo de massa reduzida (Q_{AHR}).

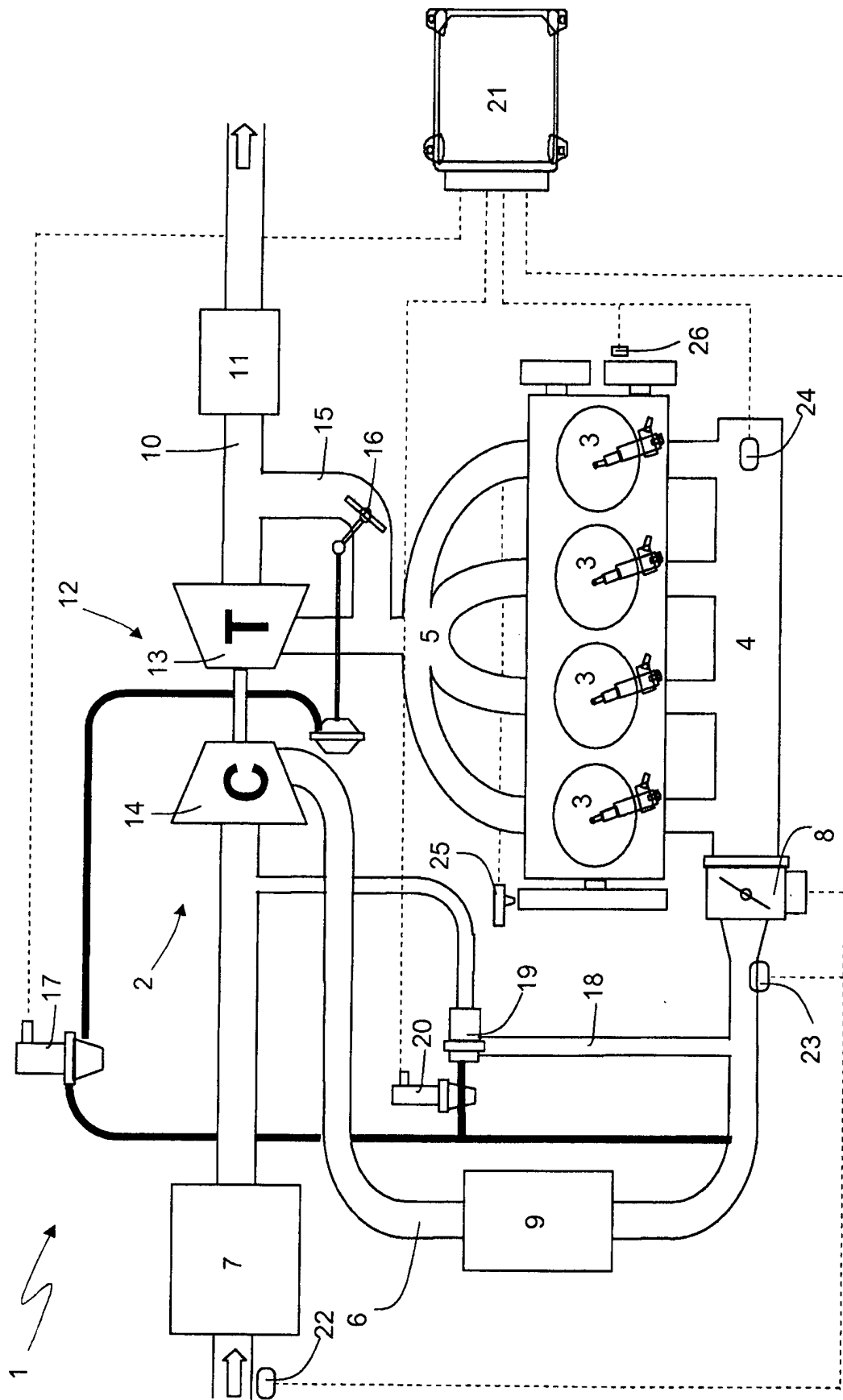


FIG.1

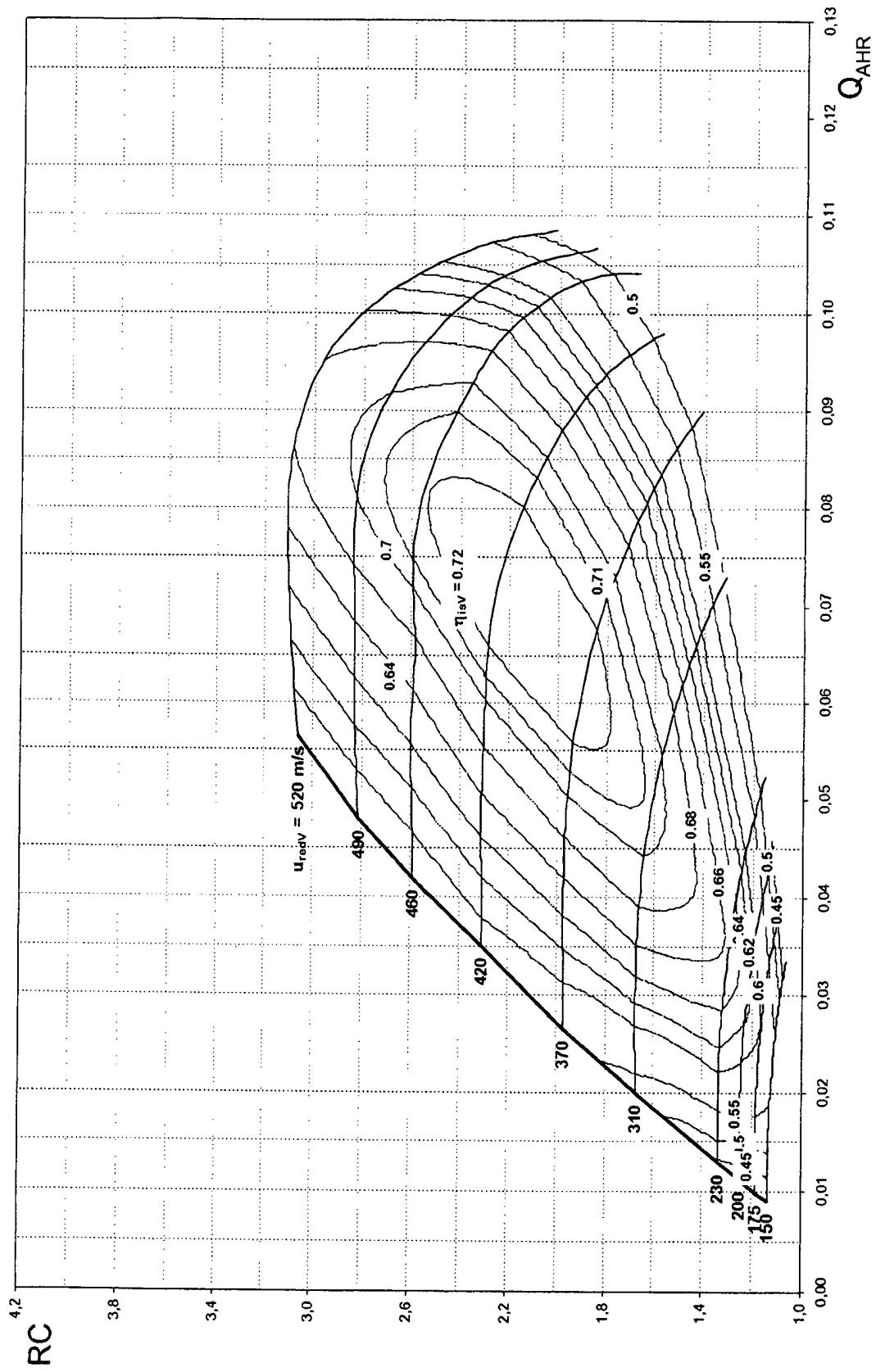


FIG.2

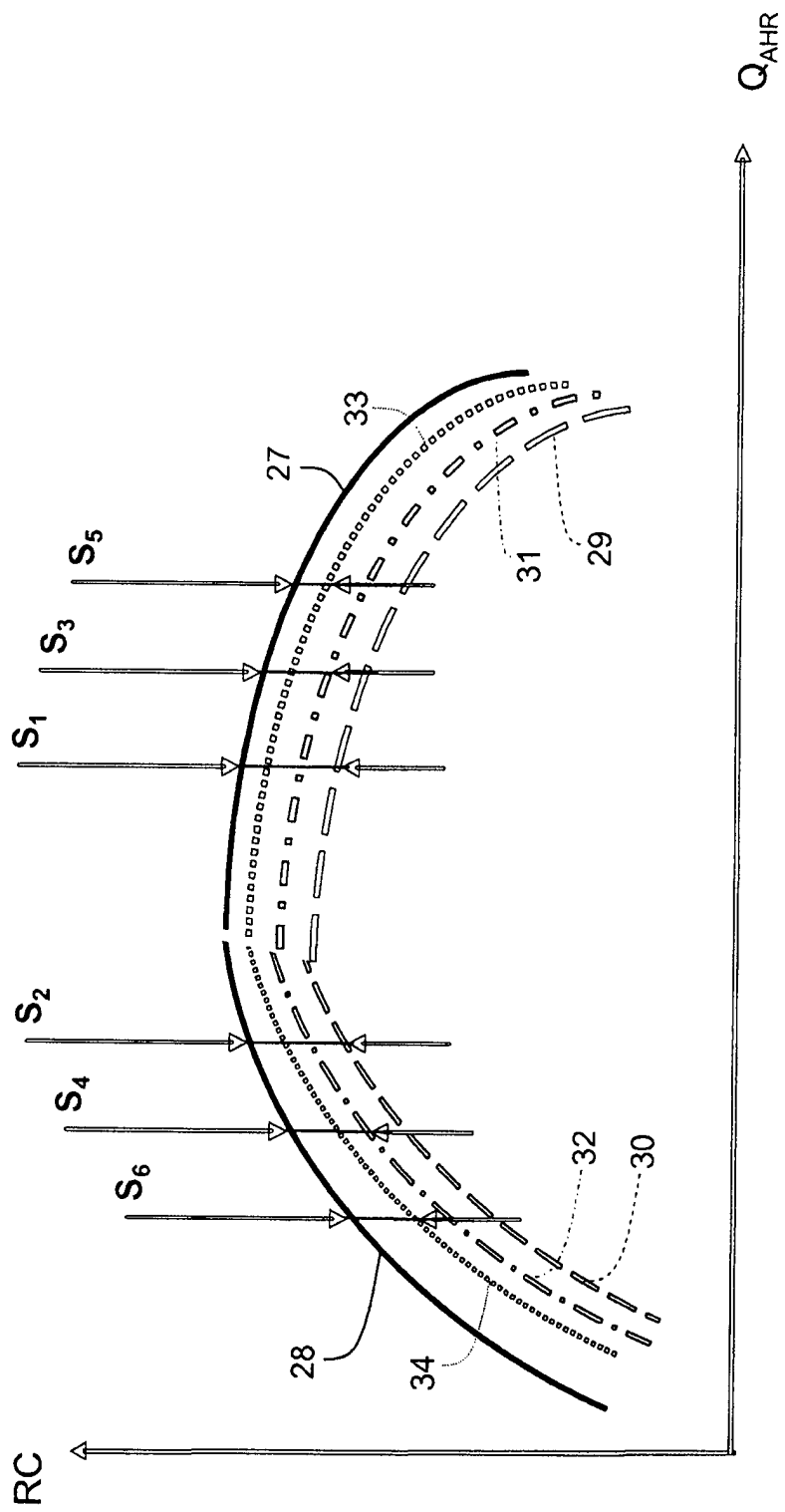


FIG.3

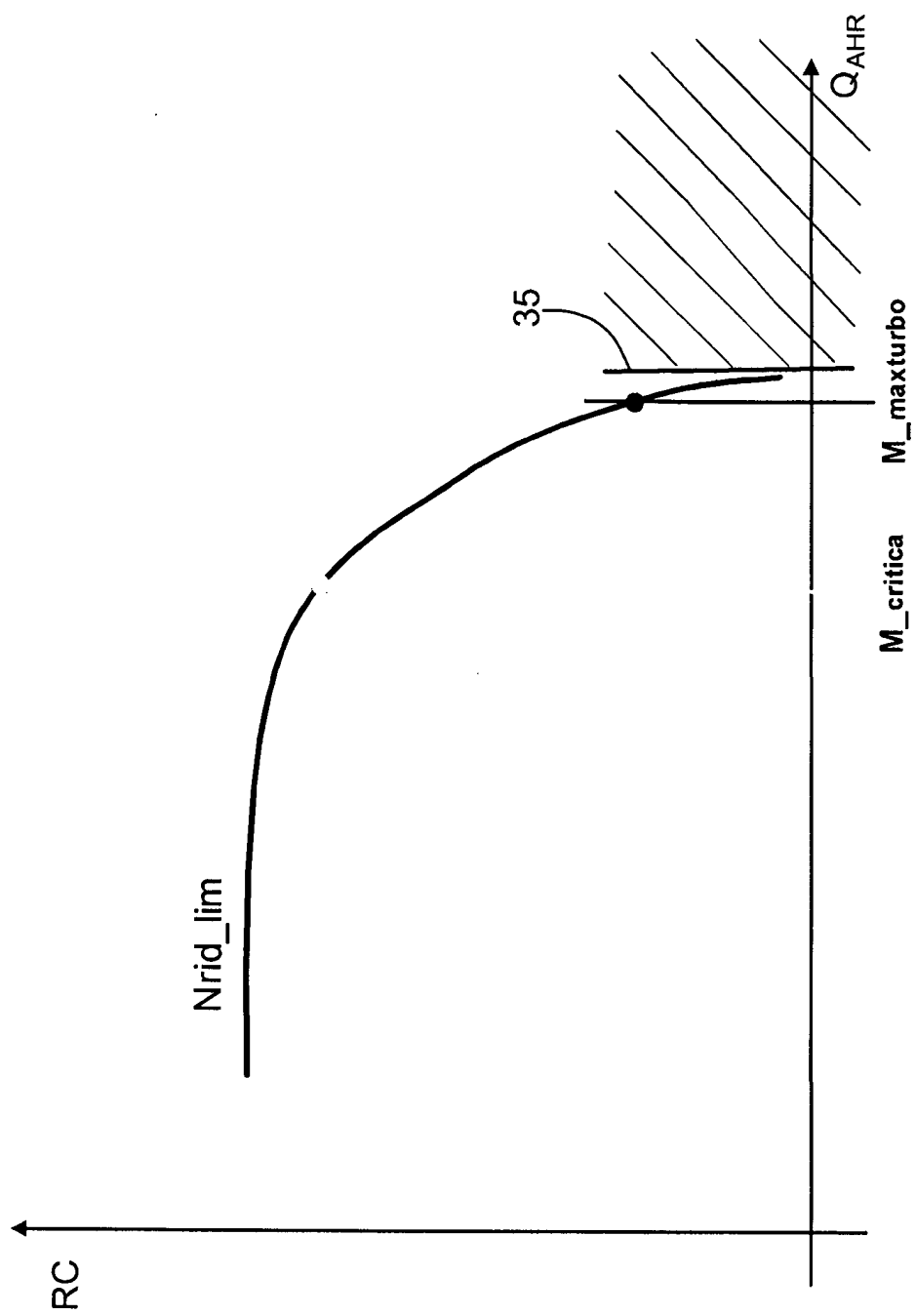


FIG.4

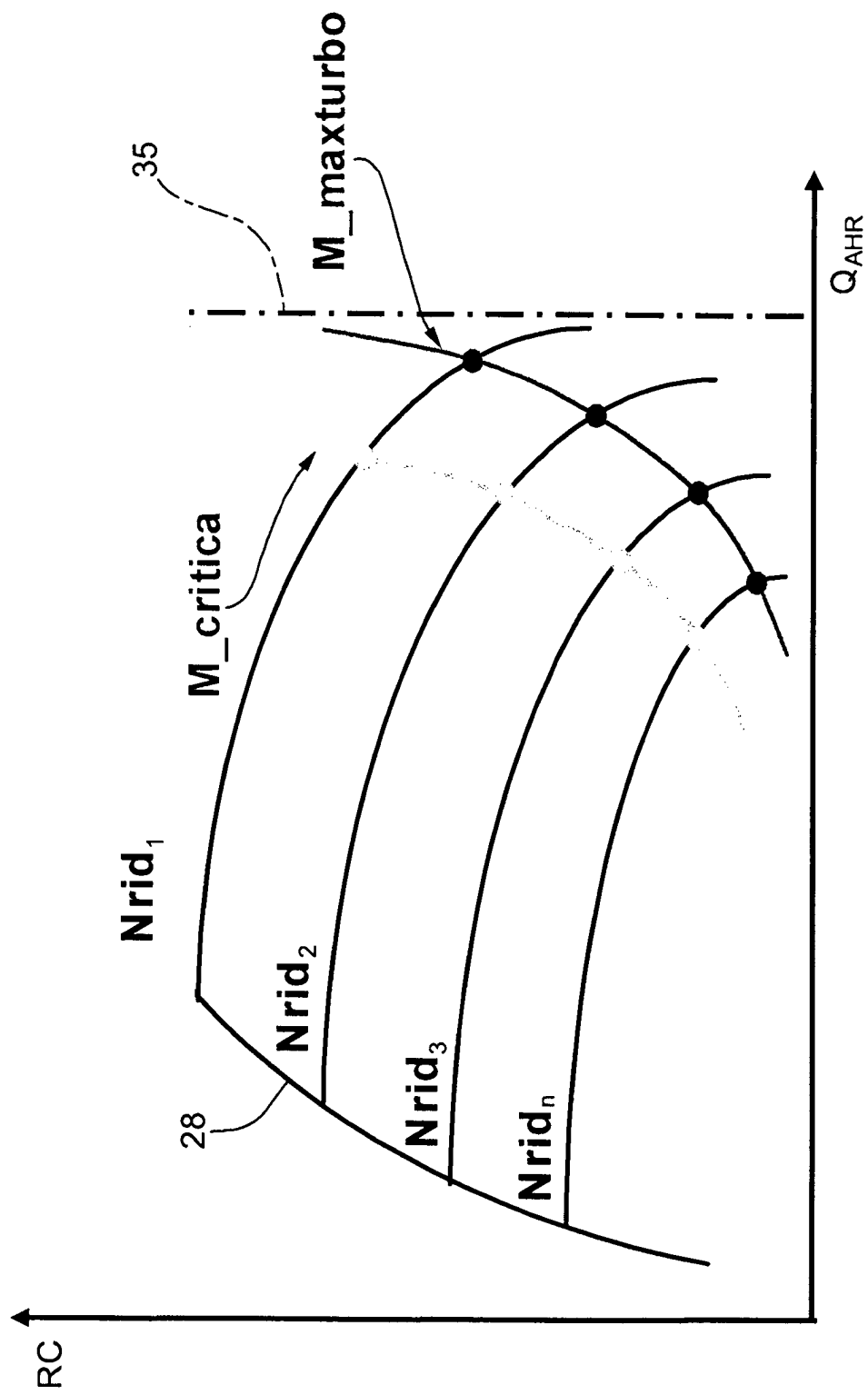


FIG.5

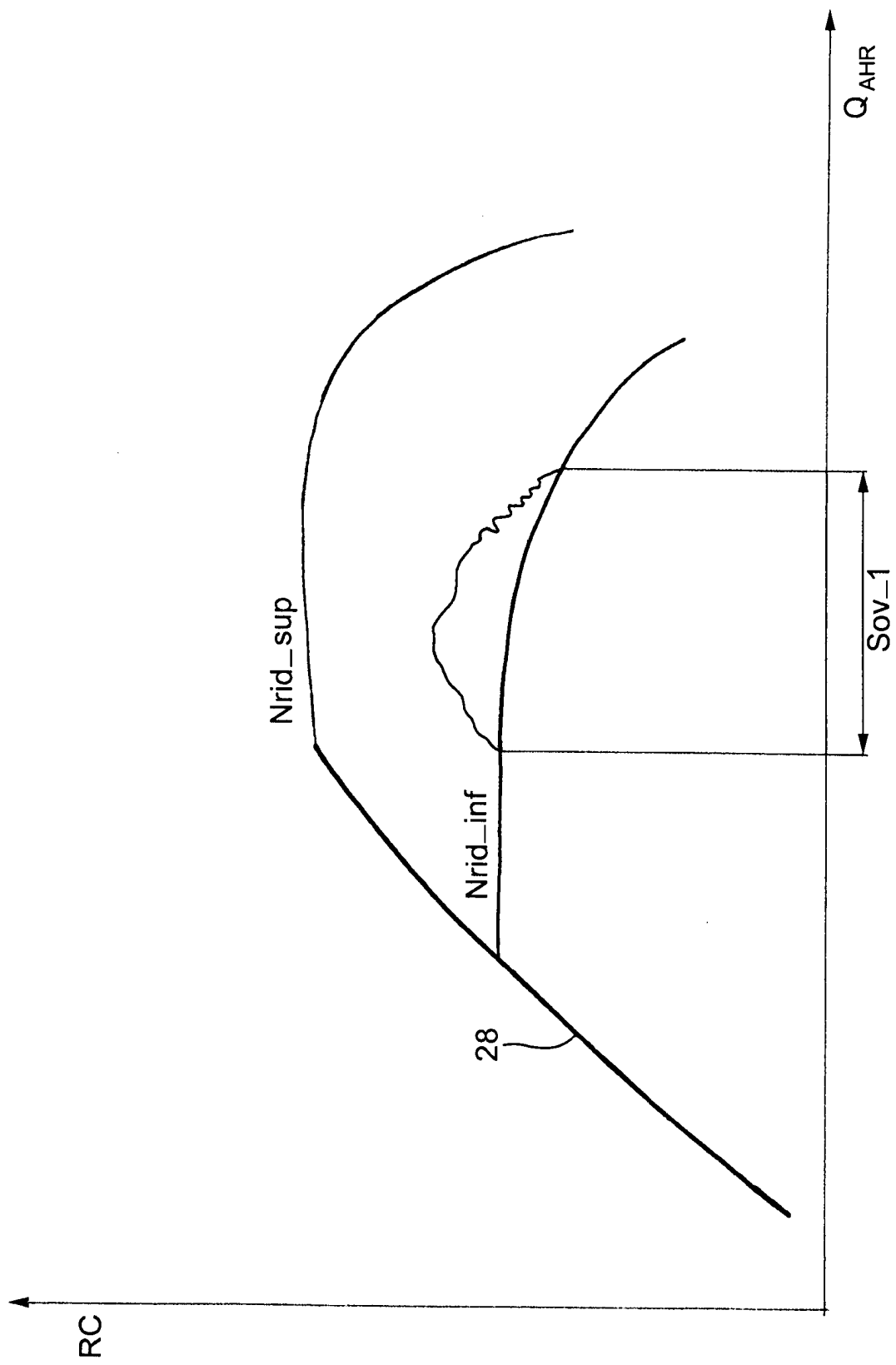


FIG.6