

CONTROLE DE CARGA E FREQUÊNCIA

Autor: Sergio Carvalhaes Moreira

ÍNDICE	PÁG.
1 - OBJETIVO	3
2 - SISTEMAS COM UMA ÚNICA UNIDADE GERADORA	4
3 - SISTEMAS ISOLADOS COM VÁRIAS UNIDADES GERADORAS	4
3.1 - Regulação Primária de Carga-Frequência.....	6
3.2 - Regulação Secundária ou Suplementar de Carga-Frequência.....	9
4 - SISTEMAS INTERLIGADOS	9
4.1 - Controle Frequência Contante	10
4.2 - Controle Supletivo de Frequência	10
4.3 - Controle de Potência com Correção Pela Frequência	10
5 - DESPACHO ECONÔMICO.....	13
5.1 - Conceito e Objetivo	13
5.2 - O Papel do ONS no Despacho Econômico	13
5.3 - Interação com o Controle de Carga-Frequência.....	14
5.4 - Despacho Econômico com Fontes Renováveis Variáveis	14
6 - CRITÉRIOS PARA AJUSTE DOS REGULADORES DE VELOCIDADE	14
6.1 - Estatismo Permanente (<i>bp</i>)	14
6.2 - Estatismo Transitório e Constante de Tempo de Estatismo Transitório.....	14
6.3 - Constante de Tempo Acelerométrica (<i>TN</i>).....	15
6.4 - Constante de Tempo de Inércia da Água (<i>TW</i>)	15
6.5 - Inércia Efetiva do Rotor da Máquina (<i>Ta</i>).....	15
6.6 - Constante de Inércia (<i>H</i>).....	15
6.7 - Overshoot.....	16
6.8 - Função de Transferência	16
6.9 - Constante de Tempo (<i>T</i>)	17
6.10 - Ganho (<i>K</i>)	18
6.11 - Exemplo Específico de um Fabricante:	20
7 - REFERÊNCIAS SOBRE O FUNCIONAMENTO DO SIN E ONS	21
8 - BIBLIOGRAFIA.....	22

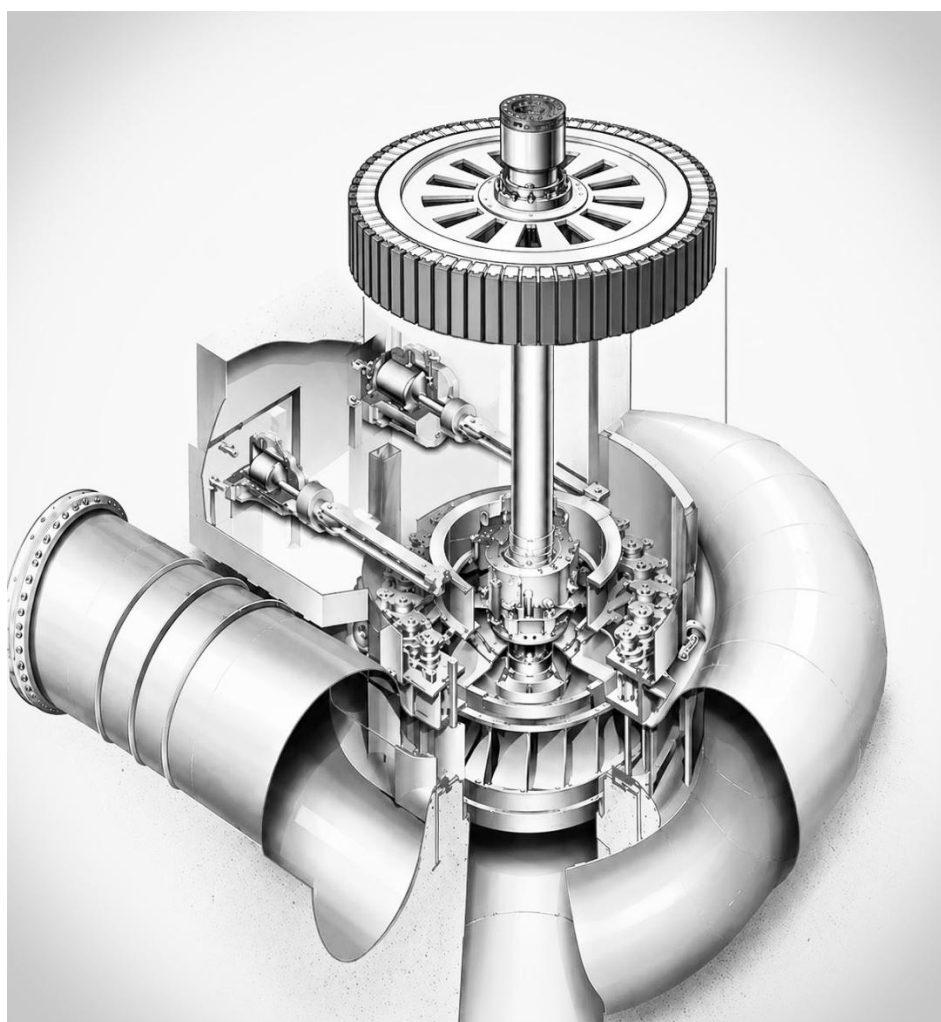
1 - OBJETIVO

O objetivo de um sistema elétrico consiste em atender as necessidades dos consumidores, em níveis aceitáveis de tensão e frequência.

Ainda que tensão e frequência em sistemas elétricos sejam variáveis interdependentes, a análise que vamos desenvolver neste trabalho, prende-se somente ao controle da potência ativa e da frequência (CONTROLE DE CARGA-FREQUÊNCIA).

Estabelecer este controle, significa procurar manter a potência gerada igual a consumida, estabilizando a frequência em seu valor nominal.

Como as cargas estão permanentemente variando, surgem diferenças entre a geração e a carga, que se refletem em variação de velocidade das unidades, alterando, portanto, a frequência dos sistemas. Este desvio é processado por um instrumento de controle que iguala a geração à carga, sem necessariamente restabelecer o valor nominal da frequência. Este dispositivo é o regulador de velocidade que para desempenhar suas tarefas, atua sobre a admissão de energia na máquina motriz (turbina), conforme indicado na figura.

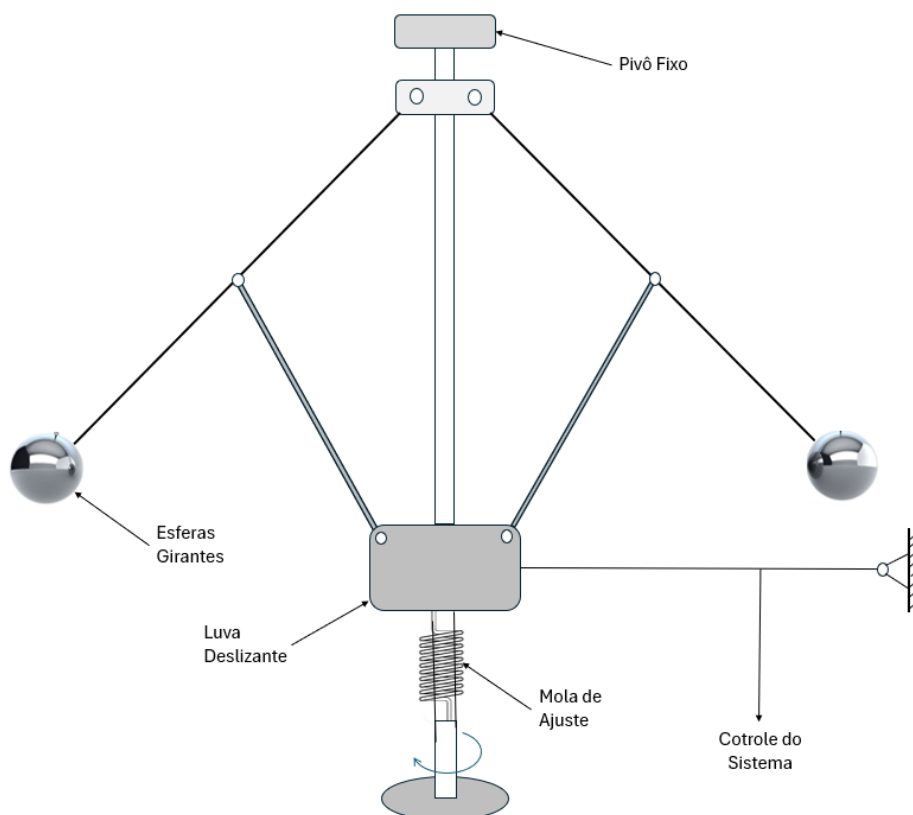


Fazendo uma análise histórica do desenvolvimento do fornecimento de energia elétrica, observamos que à medida que os sistemas foram se ampliando, os critérios de controle de potência e frequência foram se alterando e tomando-se cada vez mais complexos. Assim podemos dividir os sistemas elétricos em três gerações:

- Sistemas com uma única unidade geradora.
- Sistemas isolados com várias unidades geradoras.
- Sistemas interligados

2 - SISTEMAS COM UMA ÚNICA UNIDADE GERADORA

Os primeiros sistemas elétricos tinham pequenas máquinas operando isoladamente e alimentando as cargas, que eram todas muito próximas da estação geradora. De fato, as cidades eram pequenas e cada uma tinha o seu próprio gerador. Para sistemas deste tipo, o regulador de velocidade tem a tarefa de atender as necessidades dos consumidores, procurando estabilizar a frequência em seu valor nominal. Assim, quando ocorre uma variação na carga, o órgão sensível a velocidade, por exemplo um gerador de (ímã permanente (PMG) informa ao regulador de velocidade, que por sua vez atua, via servomotor, sobre a admissão do vapor ou água na turbina, de modo a restabelecer o valor nominal da frequência. Os reguladores de velocidade que controlam segundo este critério, são classificados como do tipo INTEGRAL e são aptos para operar apenas em sistemas de uma única unidade. A figura (regulador centrífugo de Watt) mostra a atuação do regulador integral, procurando manter a frequência em seu valor nominal.



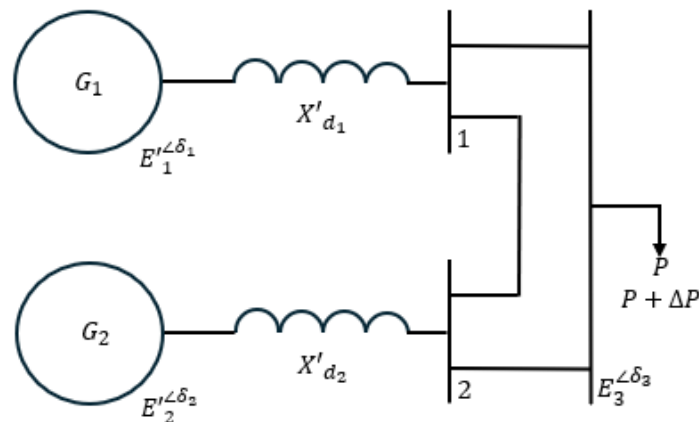
3 - SISTEMAS ISOLADOS COM VÁRIAS UNIDADES GERADORAS

À medida que as cidades foram crescendo e se industrializando, os sistemas elétricos passaram a dispor de muitas unidades operando em paralelo e aí surgiu a dúvida de como distribuir a variação de carga entre as diversas unidades, restabelecendo o valor da frequência.

Antes de iniciarmos a análise desta questão que envolve os sistemas com mais de uma unidade, vamos descrever o comportamento dinâmico das unidades, sem levar em conta a ação dos reguladores de velocidade.

Assim, ocorrido um aumento na carga, a distribuição entre as unidades se altera, provocando oscilações no movimento dos rotores dos grupos. Podemos distinguir duas fases na distribuição dessa variação de carga entre as unidades. A primeira no momento da variação, faz com que a potência se distribua proporcionalmente aos coeficientes de potência sincronizante de cada gerador, já na segunda fase o aumento de carga é absorvido pela energia cinética das máquinas, provocando sua desaceleração e, assim, a distribuição se ajusta entre as unidades, segundo a constante de inércia de cada uma.

Segue abaixo, um estudo sobre distribuição de impactos entre unidades.



No instante do impacto:

$$\Delta P_1 = \frac{K_{31}}{K_{31} + K_{32}} \Delta P$$

$$\Delta P_2 = \frac{K_{32}}{K_{31} + K_{32}} \Delta P$$

Como a potência ativa é

$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \delta$$

Assim gera uma função senoidal com P na vertical e Δ na horizontal e K é a tangente no ponto que a unidade está operando.

Em seguida o comportamento da velocidade passa a ser:

$$\frac{dw_1}{dt} = \frac{-1}{2H_1} \Delta P_1$$

$$\frac{dw_2}{dt} = \frac{-1}{2H_2} \Delta P_2$$

Depois de alguns segundos, dependendo de $H_G = H_1 + H_2$ (constante de inércia da área) o comportamento da frequência passa a ser:

$$\frac{dw_G}{dt} = \frac{-1}{2H_G} \Delta P$$

Sendo

$$w_G = \frac{w_1 H_1 + w_2 H_2}{H_1 + H_2}$$

Com isto, a frequência dos sistemas se estabiliza num valor em que a potência gerada se torna igual a potência consumida.

Vamos desenvolver agora um estudo de variação da carga com a variação da frequência e que também vai influir no controle de carga-frequência. Isto porque a carga, dependendo da quantidade de motores elétricos, é proporcional ao valor da frequência.

O novo valor da carga, supondo que a tensão não tenha se alterado, é definido pelo coeficiente de amortecimento do sistema $D = \Delta P_L / \Delta f$, de acordo com a seguinte forma:

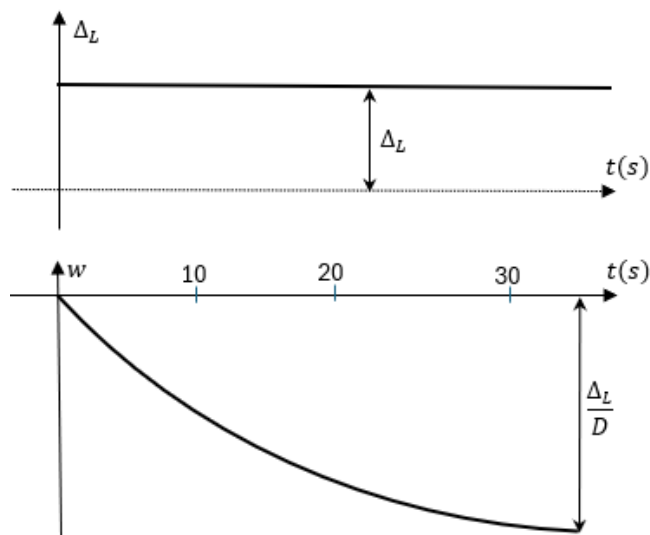
$$P_L = P_{LO} + D \Delta f$$

Onde:

- P_{LO} – é a potência da carga na frequência nominal

- Δf – é a variação de frequência e sendo de 2% a variação de potência para 1% de variação de frequência.
- D - coeficiente de amortecimento D , mais comum entre os sistemas elétricos industrializados.

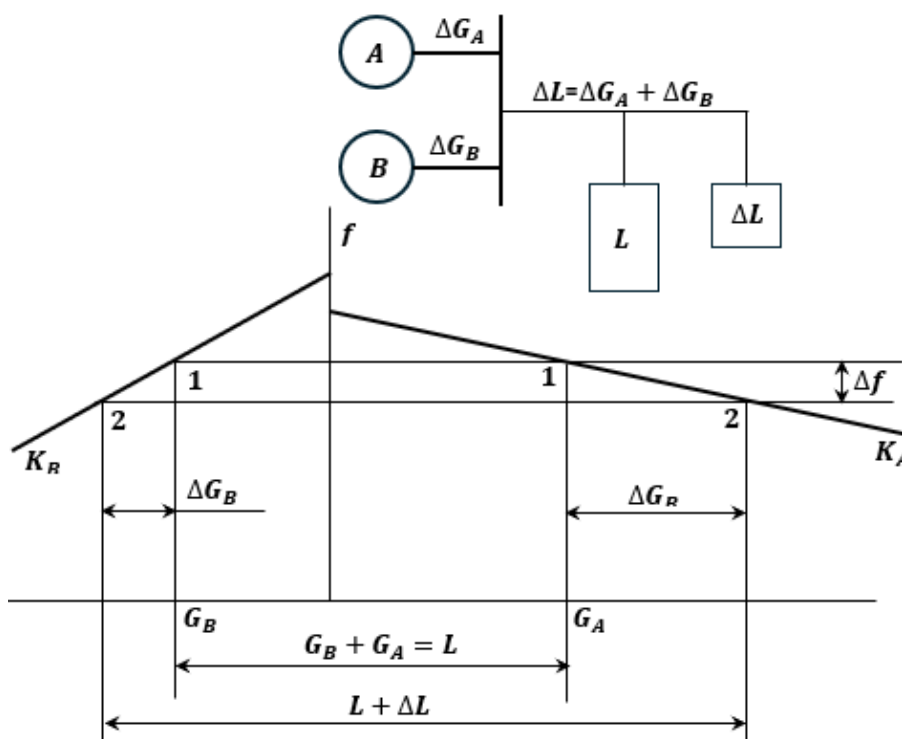
A figura mostra o comportamento da velocidade de uma unidade em seguida a uma variação de carga, sem considerar a ação do regulador e as oscilações do período transitório.



3.1 - Regulação Primária de Carga-Frequência

Em seguida a esta descrição do comportamento dinâmico das máquinas, vamos estabelecer os critérios de regulação de sistemas operando unidades em paralelo, através de reguladores denominados PROPORCIONAIS, capazes de repartir a variação de carga entre muitas unidades.

A regulação de carga-frequência apresenta duas fases de atuação. Na primeira, chamada regulação primária, os reguladores proporcionais das unidades igualam a geração à carga, sem nenhuma responsabilidade de restabelecer o valor nominal da frequência. A atuação dos reguladores vai definir a potência gerada por cada unidade, proporcionalmente ao estatismo de cada regulador e em função do novo valor da frequência, conforme indicado na figura. Na segunda fase, será restabelecido o valor nominal da frequência.



Estatismo (speed-drop) é o valor do estado permanente do desvio de frequência Δf exigido para produzir uma variação de 100% na posição das palhetas do distribuidor ou na potência gerada pela unidade. Pode também ser expresso em percentagem como:

$$\frac{(f_a - f_b)}{f_0}$$

Onde:

- f_a é a frequência de estado permanente a vazio (distribuidor aberto apenas o suficiente para alimentar as perdas)
- f_b é a frequência de estado permanente a plena carga (distribuidor totalmente aberto)
- f_0 é a frequência nominal

Por exemplo, imagine-se uma unidade de 90 MW, que opera numa frequência nominal de 60 Hz e que tenha o estatismo de seu regulador de velocidade ajustado em 5%. Vamos determinar a contribuição de potência desta máquina à medida que a frequência varie.

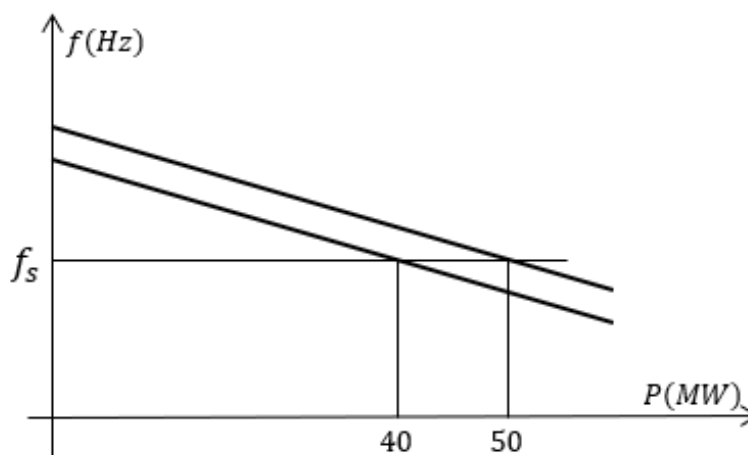
Sabemos que para uma mudança total na posição das palhetas, o que provoca uma variação aproximada de 90 MW de potência, é necessária uma variação de 5% de frequência, assim temos:

$$\Delta f = 0,05 \times 60 \text{ Hz} = 3 \text{ Hz}$$

$$K = \frac{90 \text{ MW}}{3 \text{ Hz}} = 30 \text{ MW/Hz}$$

Esta relação é conhecida como característica K de regulação e tem uma grande importância no controle primário de carga-frequência, estabelece a contribuição de potência à medida que a frequência varie.

Num outro exemplo, temos uma unidade que está fornecendo 40 MW a frequência de 59.2 Hz. O despacho numa reprogramação da carga, para melhorar a frequência, determina que esta máquina deve fornecer 50 MW. O operador então deverá atuar numa chave de controle, instalada no painel do regulador de velocidade, denominada comumente de AJUSTE DE REFERÊNCIA DE VELOCIDADE e procurar a paralela, ajustando o setpoint que, na frequência do sistema, forneça a potência determinada, conforme indicado na figura.



Note que para o caso geral de muitas máquinas, a geração total parece um sistema infinito relativo à unidade individual, de maneira que o efeito na mudança do Ajuste de Referência de Velocidade de um regulador produz basicamente uma mudança na potência gerada por aquela unidade e quase nenhuma influência na alteração do valor da frequência.

Agora vamos dar, como exemplo, um sistema com duas unidades, sendo que a primeira tem o estatismo do regulador ajustado em 5% e com a potência nominal de 90 MW, a segunda com 4% e 120 MW. Determinar a nova frequência do sistema e a contribuição de cada máquina para uma variação de 40 mW.

Características da máquina 1:

$$\Delta f = 0,05 \times 60 \text{ Hz} = 3 \text{ Hz}$$

$$K_1 = \frac{90 \text{ MW}}{3 \text{ Hz}} = 30 \text{ MW/Hz}$$

Características da máquina 2:

$$\Delta f = 0,04 \times 60 \text{ Hz} = 2,4 \text{ Hz}$$

$$K_2 = \frac{120 \text{ MW}}{2,4 \text{ Hz}} = 50 \text{ MW/Hz}$$

Portanto,

$$K = K_1 + K_2$$

$$K = 30 + 50 = 80 \text{ MW/Hz}$$

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$

Nova frequência:

$$60 \text{ Hz} - 0,5 \text{ Hz} = 59,5 \text{ Hz}$$

Contribuição da máquina 1:

$$30 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} = \frac{\Delta P}{0,5 \text{ Hz}} \quad \Delta P = 15 \text{ MW}$$

Contribuição da máquina 2:

$$50 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} = \frac{\Delta P}{0,5 \text{ Hz}} \quad \Delta P = 25 \text{ MW}$$

Outro ponto a se observar é que em usinas de muitas unidades, por facilidade de operação, colocam-se todas as unidades sob a ação de um equipamento de controle (JOINT-CONTROL), que se porta como se fosse um único regulador de velocidade, com característica própria e capaz de dividir igualmente a potência gerada na usina, entre as unidades.

Para concluir a análise da regulação primária de carga-frequência, é fundamental definirmos o conceito de característica de uma área que contém um sistema com muitas unidades geradoras.

Temos que:

$$K_{area} = K_1 + K_2 + \dots + K_N$$

Supondo que

$$K_1 = 40 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \quad K_2 = 30 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \quad K_3 = 60 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \quad K_4 = 80 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

sejam as características das 4 unidades que alimentam uma área e $D = 15 \text{ MW/Hz}$ o coeficiente de amortecimento do sistema.

$$K_{area} = 40 + 30 + 60 + 80 = 210 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

$$K_{area+D} = 210 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} + 15 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} = 225 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

Significando que, se a frequência caiu 1 Hz, é porque a carga na área aumentou de 225 MW, já que:

$$\Delta f = \frac{\Delta L}{K_{area} + D}$$

3.2 - Regulação Secundaria ou Suplementar de Carga-Frequência

Finda a regulação primaria, surge agora uma outra questão, a variação de carga está distribuída entre as unidades do sistema, mas a frequência se estabilizou em valor diferente do nominal.

Nesta segunda fase de regulação denominada regulado secundaria ou suplementar, a frequência é restabelecida pela atuação de comando manual ou automático sobre a chave do controle de ajuste de referência de velocidade, de todas ou de algumas das unidades do sistema.

Esta atuação automática é feita por um controlador de área, que é um sistema computacional, atuando sobre os ajustes de referência de velocidade dos reguladores das unidades, com a finalidade de restabelecer a frequência a seu valor nominal, ou seja, tornar $\Delta f = 0$.

4 - SISTEMAS INTERLIGADOS

Até aqui temos nos referido ao conjunto de máquinas operando em paralelo, simplesmente como um sistema elétrico. Na realidade, o crescimento da utilização da energia elétrica fez com que a atuação das diversas concessionárias de eletricidade tornarem-se adjacentes e até mesmo superpostas.

Com isso, as empresas de cada região passaram a ser uma ÁREA, o conjunto de ÁREAS interligadas formando um SISTEMA que com todas essas áreas interligadas formou-se o SIN, Sistema Interligado Nacional Brasileiro.

Para que se consiga aumentar a confiabilidade desse Sistema, as companhias adjacentes que formam uma área mantem uma reserva girante de modo a se suprirem, sempre que necessário, para assegurar continuidade de fornecimento aos consumidores. Esta reserva age para atender emergências, não só dentro de cada área como também entre áreas.

Através das linhas de interligação que interligam as áreas, são definidos fluxos programados de demanda e energia, de modo a operar conforme valores definidos pelos estudos de fluxo de potência e com os acordos comerciais acertados com as concessionárias sempre procurando economizar tanto nos custos de instalação quanto no de operação das áreas.

Com vantagem para reduzir custo de instalação, podemos citar a não simultaneidade entre as demandas máximas das áreas, reduzindo, portanto, a potência de geração instalada em cada uma.

Para diminuir custos de operação, procuramos aproveitar melhor os recursos hidráulicos, utilizando a diversidade das estações de chuva, ou seja, gerando energia nas áreas em que os reservatórios estão cheios, sem o que seríamos obrigados a uma maior geração térmica.

Com as interligações é possível também, operar as unidades de forma mais econômica, já que se pode obter geração numa área, com o custo menor que teria a mesma geração, ao mesmo tempo, em áreas adjacentes.

Atualmente, dentro da operação do SIN, estão sendo consideradas outros tipos de fontes renováveis como as gerações eólicas, solares, biomassa, entre outras, de forma a racionalizar ainda mais a operação do Sistema.

O critério de regulação primaria para áreas interligadas é idêntico ao de uma área isolada ou seja os reguladores de velocidade vão se limitar a estabelecer novo valor de frequência conforme o estatismo definido, ao passo que o de regulação secundaria, num sistema interligado, difere porque além de restabelecer o valor da frequência supervisiona a potência de interligação procurando atender os valores definidos pelo estudo de fluxo de potência e os acordos comerciais acertados entre as concessionárias e a ANEEL.

Existem três métodos de regulação secundária para sistemas interligados, a saber:

4.1 - Controle Frequência Contante

Neste método, Controle Frequência Contante (FLAT FREQUENCY - FLAT TIE - LINE CONTROL), enquanto uma área controla a frequência, a outra controla a potência de interligação. Ele não satisfaz porque não restringe a variação de geração a área em que houve variação de carga, provocando flutuações nas potências de interligação.

4.2 - Controle Supletivo de Frequência

Neste método, Controle Supletivo de Frequência (SELECTIVE FREQUENCY CONTROL), as áreas controlam tanto a frequência como a potência apenas na área que houve variação de carga, bloqueando a ação de controle nas outras áreas e não permitindo ajuda entre áreas além da programada. Este método tem a sua utilização restrita aos sistemas onde há grandes diferenças entre as capacidades de geração entre as áreas. Ficando o controle da frequência com a área que possui geração muito maior que a outra.

4.3 - Controle de Potência com Correção Pela Frequência

Considerando que este método, Controle de Potência com Correção Pela Frequência (TIE - LINE - BIAS CONTROL - TLB), é o mais empregado em todos os grandes sistemas com interligações, tanto na Europa como nos Estados Unidos e como é o critério utilizado no Brasil, vamos analisá-lo em detalhe.

O objetivo básico deste método é a restauração do equilíbrio entre as variações de carga e de geração de uma área, procurando levar o desvio de frequência e o desvio de potência de interligação a zero.

Para tanto, forma-se uma grandeza chamada ERRO DE CONTROLE DE AREA, formada de duas parcelas, sendo uma o erro de potência da interligação e outra o desvio de frequência multiplicado por um fator ajustável chamado B e que é a característica da regulação secundária (BIAS), expresso em MW/Hz e que estabelece a participação do erro de frequência na regulação da área.

Deste raciocínio surge a equação:

$$E = (T_1 - T_0) - B(f_1 - f_0)$$

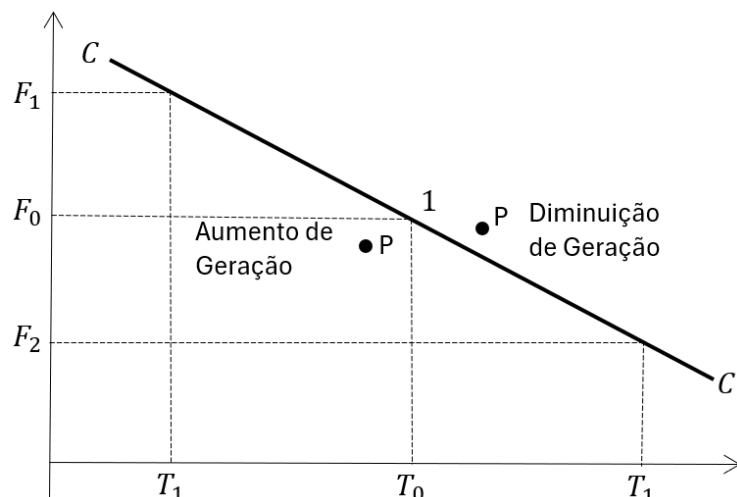
Onde:

- E - Erro de controle de área
- T_1 - Potência de interligação após a variação da carga
- f_1 - Frequência do sistema após a variação da carga
- T_0 - Potência de interligação programada
- f_0 - Frequência nominal
- B - Parâmetro definido pela relação entre as variações da potência ativa e o de frequência na área a ser considerado no cálculo do ECA sempre que houver variação de carga na área.

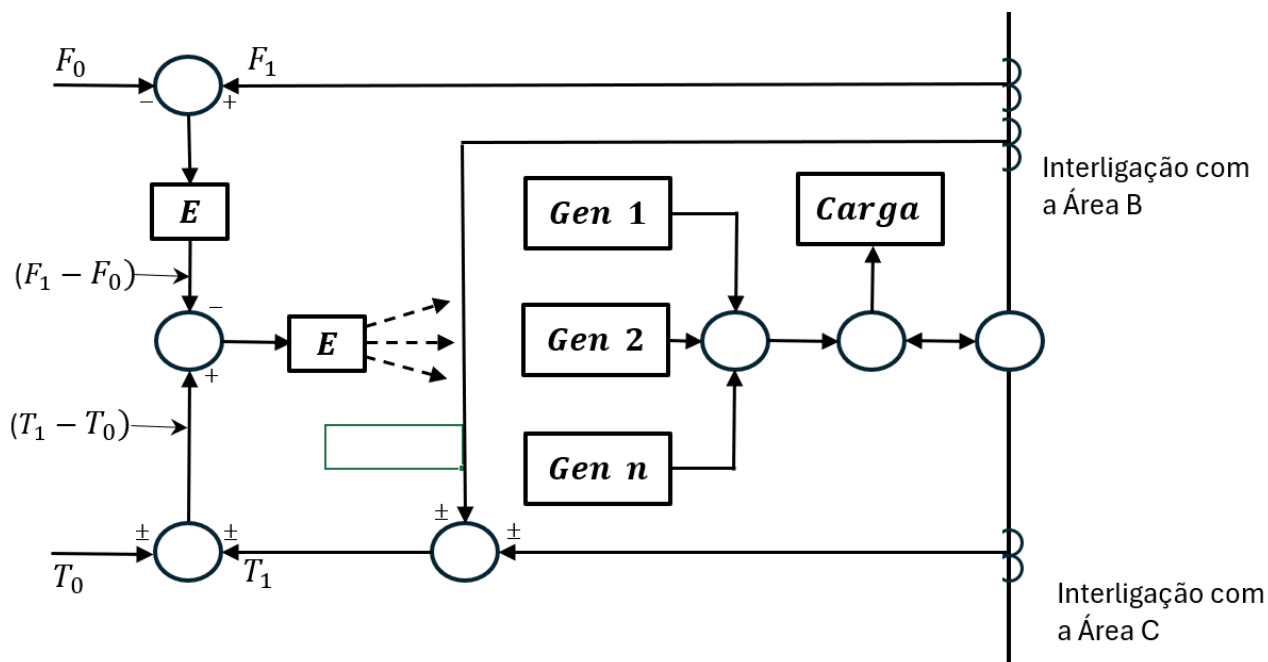
O objetivo da regulação da área é calcular E continuamente e ajustar a geração da área em que houve variação de modo a zerar o valor de E .

Para que se restrinja a variação de geração à área em que houve variação de carga, ajusta-se o (BIAS) com o mesmo valor da CARACTERISTICA K DA AREA, grandeza a que já nos referimos anteriormente quando apresentamos no item 3.1 a Regulação Primária de Carga-Frequência.

Na figura apresentam-se as características de controle do TLB (Controle de Potência com Correção pela Frequência), operando de modo a reduzir o E a zero. O ponto 1 na reta CC define a potência de interligação programada T_0 e a frequência nominal f_0 .



A figura apresenta um diagrama em bloco de computação do erro de controle de área.



Partindo-se da equação:

$$E = (T_1 - T_0) - B(f_1 - f_0)$$

conclui-se que enquanto os pontos, cujas coordenadas são $(T_1 - T_0)$ e $(f_1 - f_0)$, estão sobre a reta CC, o valor de E é zero, já que seu deslocamento horizontal é exatamente:

$$(T_1 - T_0) - B(f_1 - f_0)$$

que é o valor de E .

Quando o ponto está acima da reta CC, E é positivo, indicando a necessidade de diminuir a geração, enquanto quando o ponto está abaixo da reta CC, E é negativo, caracterizando a necessidade de aumentar a geração.

Em cada um destes casos, o controle automático da área em que houve a variação da carga, estabelece a nova geração através dos ajustes de referência de velocidade dos reguladores de algumas (não há necessidade de ser em todas) das unidades da área em que houve a variação de carga, até que E seja zerado.

Nas outras áreas interligadas, como não houve alteração na carga, a variação da potência de interligação foi compensada pelo fator $B (f_1 - f_0)$ de modo que o valor de E seja zero. Para que se consiga isto é preciso que, como já dissemos anteriormente, o valor de B de cada área seja igual a característica K de regulação primária de cada área, respectivamente. Isto porque o Δf produzirá, em cada área, através da regulação primária, um ΔP produzirá, em cada área, através de regulação primária, um ΔP que será levado a interligação, já que não houve variação de carga nestas áreas.

Voltando a equação:

$$E = (T_1 - T_0) - B (f_1 - f_0)$$

e substituindo B por K_{area} , temos:

$$E = (T_1 - T_0) - K_{area} (f_1 - f_0)$$

$$E = \Delta P - K_{area} \Delta f$$

Como

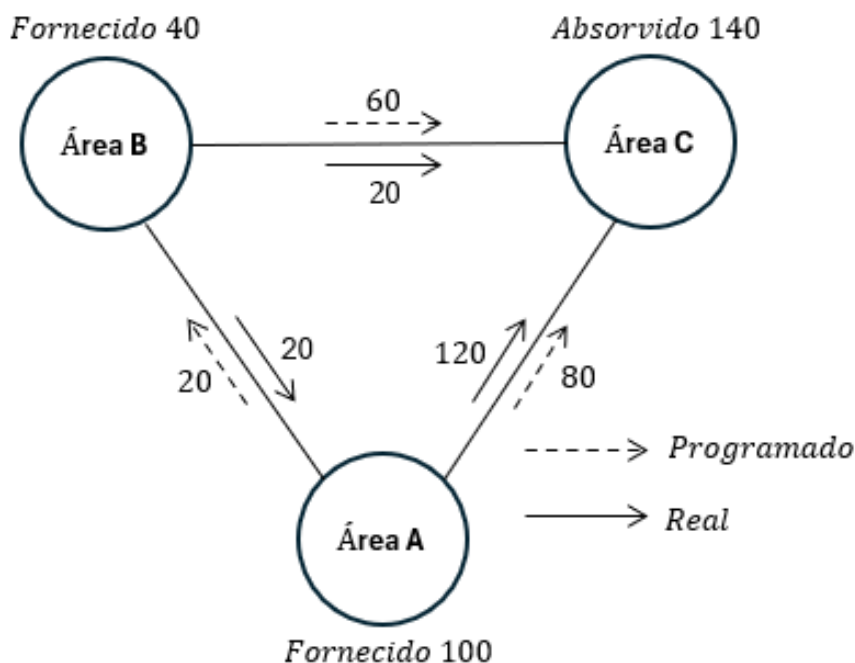
$$K_{area} = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$

temos:

$$E = \Delta P - \frac{\Delta P}{\Delta f} \Delta f = 0$$

Assim, concluímos que não haverá regulação secundária nas áreas onde não houve variação de carga. Evidentemente que por dedução semelhante o E será diferente de zero na área onde houve variação de carga.

Quando uma área tem linhas de interligação com mais de uma área, o valor T_0 , que significa a potência de interligação programada da área, refere-se a soma dos intercâmbios desta área com as demais, não havendo nenhuma preocupação em obedecer aos valores de interligação estabelecidos para intercambio com cada uma das demais áreas. Isto pode ser visto, observando-se, na figura, os valores programados e ocorridos entre três áreas interligadas.



INTERLIGAÇÃO	INTERCAMBIO LÍQUIDO PROGRAMADO	INTERCAMBIO LÍQUIDO REAL
AB	20 PARA B	20 PARA A
AC	80 PARA C	120 PARA C
BC	60 PARA C	20 PARA C

ÁREA	INTERCAMBIO LÍQUIDO PROGRAMADO	INTERCAMBIO LÍQUIDO REAL
A	100 FORNECIDO	100 FORNECIDO
B	40 FORNECIDO	40 FORNECIDO
C	140 FORNECIDO	140 ABSORVIDO

Resumindo, temos as seguintes etapas num controle de carga-frequência em áreas interligadas:

- Carga aumenta numa área, frequência diminui;
- Os reguladores de todas as unidades geradoras das áreas, tomam parte no aumento de geração, para restabelecer o equilíbrio entre a geração e a demanda, porém, em valor abaixo da frequência-nominal. A área, na qual houve aumento de carga recebeu uma ajuda involuntária, chamada "POOL ASSISTANCE";
- O CONTROLADOR DE AREA da área em que houve variação de carga vai atuar para restabelecer o valor da frequência e da potência de interligação baseado nos critérios citados sobre o valor do ECA.

5 - DESPACHO ECONÔMICO

5.1 - Conceito e Objetivo

O controle de carga-frequência descrito nos capítulos anteriores atua na escala de segundos (regulação primária) a minutos (regulação secundária) para manter o equilíbrio instantâneo entre geração e demanda. Entretanto, a decisão sobre quais usinas devem gerar e quanto cada uma deve produzir ao longo do dia, da semana ou do mês é orientada por um critério econômico: o despacho econômico.

O objetivo do despacho econômico é distribuir a geração necessária ao atendimento da carga entre as diversas unidades de uma área ou de todo o Sistema Interligado Nacional (SIN) de forma a minimizar o custo total de operação, respeitando as restrições operativas e de segurança do sistema. No caso brasileiro, predominantemente hidrotérmico, isso significa decidir quando armazenar água nos reservatórios (gerando menos no presente) e quando turbiná-la (gerando mais), considerando o custo de oportunidade da água.

5.2 - O Papel do ONS no Despacho Econômico

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável por coordenar e controlar a operação da geração e transmissão de energia no SIN. O ONS atua harmonizando a otimização econômica do despacho com a segurança operativa das redes de transmissão.

O processo de despacho no SIN segue uma hierarquia de planejamento:

- Plano da Operação Energética (PEN): elaborado anualmente, com horizonte de 5 anos, definindo as diretrizes estratégicas para a operação dos reservatórios.
- Programa Mensal de Operação (PMO): detalha a operação para o mês seguinte, com a participação dos agentes.

- Programação Diária da Operação: define o despacho propriamente dito para cada dia, com atualizações a cada 30 minutos.

O Centro Nacional de Operação do Sistema (CNOS) do ONS é responsável por coordenar o despacho de geração em tempo real, ajustando a programação diante de imprevistos (variações de carga, indisponibilidade de usinas, mudanças hidrológicas etc.).

5.3 - Interação com o Controle de Carga-Frequência

O despacho econômico atua em uma escala de tempo mais lenta (minutos a horas) e define os setpoints de potência (referências de carga) para cada usina. Esses setpoints são então enviados aos reguladores de velocidade das unidades, que atuam na regulação primária e secundária para seguir as referências estabelecidas e corrigir desvios instantâneos.

Em sistemas interligados, o despacho econômico também define os fluxos programados de potência nas interligações entre áreas. O controle secundário (TLB) atua para manter esses fluxos dentro dos limites programados, enquanto o despacho econômico recalcula periodicamente esses valores para refletir as condições econômicas e hidrológicas de cada área.

5.4 - Despacho Econômico com Fontes Renováveis Variáveis

A crescente inserção de fontes renováveis intermitentes, eólica, solar fotovoltaica e biomassa, impõe novos desafios ao despacho econômico. Como essas fontes têm custo marginal próximo de zero, elas são despachadas preferencialmente. No entanto, sua variabilidade e incerteza exigem:

- Maior flexibilidade das usinas hidrelétricas e termelétricas para compensar flutuações;
- Modelos de previsão de curto prazo mais precisos;
- Redefinição do conceito de "reserva girante" para lidar com a intermitência.

O ONS já incorpora esses fatores em seus modelos de planejamento e operação, refletindo a transição energética em curso no Brasil.

6 - CRITÉRIOS PARA AJUSTE DOS REGULADORES DE VELOCIDADE

Para se otimizar a operação de um regulador de velocidade, ou seja, conseguir sincronizar facilmente uma unidade e torná-la estável sempre que houver uma variação de carga no sistema, é preciso que os parâmetros do regulador de velocidade sejam devidamente ajustados.

Para tanto, inicialmente, definiremos esses parâmetros assim como as grandezas que são utilizadas na determinação dos valores desses parâmetros.

Assim temos:

6.1 - Estatismo Permanente (bp)

Esta grandeza dispensa maiores comentários uma vez que já foi discutida anteriormente. O sistema elétrico brasileiro é ajustado em 5% e a faixa de ajuste mais encontrada entre os fabricantes mais tradicionais dos reguladores de velocidade é de 0 a 10%.

6.2 - Estatismo Transitório e Constante de Tempo de Estatismo Transitório

O estatismo transitório (bt) e a constante de tempo de estatismo transitório (T_d), estão relacionados ao fato de que os sistemas hidráulicos, devido a suas características naturais, necessitam de reguladores com funções apropriadas para obter um controle estável. Esta característica natural do sistema hidráulico, do qual a turbina faz parte, é que inicialmente o valor da variação da potência desenvolvida na turbina é inverso em relação à direção da variação da posição da palheta do distribuidor. Assim, nos primeiros momentos após o movimento de abertura das palhetas do distribuidor, os valores da potência mecânica desenvolvida pela turbina diminuem e em consequência o da frequência também.

Para compensar esta característica, instala-se dentro do circuito eletrônico do regulador de velocidade, uma função idêntica à do estatismo permanente, mas que funciona somente durante a oscilação. Por isto, denominou-se estatismo transitório.

Então, por exemplo, para uma máquina de 120MW, um ajuste de 5% para o estatismo permanente e 50% para o estatismo provisório significa que as características de regulação (K), como já vimos anteriormente, serão:

Estatismo permanente:

$$K = \frac{120MW}{0,05 \times 60Hz} = 40 \frac{MW}{Hz}$$

Estatismo transitório

$$K = \frac{120MW}{0,5 \times 60Hz} = 4 \frac{MW}{Hz}$$

Assim, para cada Hertz de aumento na frequência, após um alívio de carga, o sistema de controle exige, durante a fase transitória, muito menos contribuição de potência da turbina do que durante o período permanente. Com isto o sistema de regulação transitória consegue, com um substancial aumento na abertura do distribuidor, atender à solicitação de potência, determinada pela característica de regulação em função da variação de frequência.

6.3 - Constante de Tempo Acelerométrica (T_N)

Com o objetivo de melhorar as suas propriedades de controle, o regulador é fornecido com um sinal de aceleração, proporcional a derivada da frequência em relação ao tempo. Este sinal tem um efeito estabilizador evitando assim as oscilações prolongadas, além de conseguir reduzir o tempo de regulação, ou seja, alcançar mais rápido o valor de regime permanente. Trata-se de instrumento de extrema eficiência durante o processo de sincronização da unidade, que é o momento em que ocorrem grandes variações de frequência da unidade.

6.4 - Constante de Tempo de Inércia da Água (T_W)

A Constante de Tempo de Inércia da Água (T_W) é expressa em segundos e é calculada pela expressão:

$$T_W = \frac{L \times V_{max}}{g \times H_n}$$

Onde:

- L - Comprimento do condutor forçado em metros.
- V_{max} , - velocidade máxima da água em metros/segundo.
- g - Aceleração da gravidade (9,81 m/s²)
- H_n – altura nominal em metros

6.5 - Inércia Efetiva do Rotor da Máquina (T_a)

a Inércia Efetiva do Rotor da Máquina é definida por:

$$T_a = 2H$$

sendo que H é a constante de tempo de inércia e tem as dimensões de $KW.s/kVA$ ou segundo. O significado de H pode ser entendido como a quantidade de tempo que a unidade gasta para alterar a velocidade de $0,5pu.$, pela ação de um torque de aceleração ou desaceleração constante e igual a $1pu.$

6.6 - Constante de Inércia (H)

O valor da constante de inércia H pode ser calculado através da fórmula abaixo:

$$H = \frac{GD^2n^2}{730000xS}$$

Onde:

- H – Constante de inércia em segundos
- GD^2 - Momento de inercia, onde G correspondente a massa do rotor e D o diâmetro do rotor, lembrando que o momento de inercia é a integral de $R^2 dm$, expressa em $t.m^2$
- n - Velocidade angular do rotor em RPM
- S - Potência nominal em MVA

Exemplo: Calcular o valor de H , supondo conhecidos:

P - 180 MVA

n - 100 rpm

GD^2 - 44.000 $t.m^2$

$$H = \frac{44000x100^2}{730000x180} = 3,35s$$

O valor de H também pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$H = \frac{1,37x10^{-6}xGD^2n^2}{S}$$

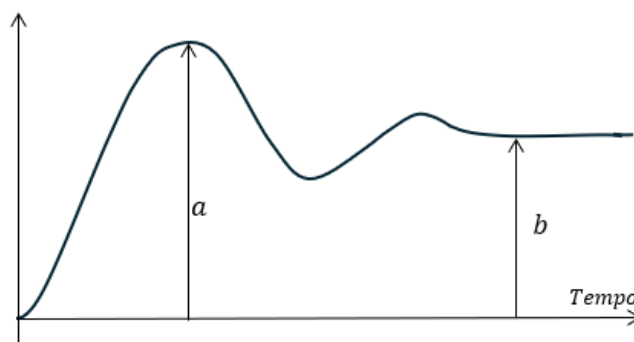
$$H = \frac{1,37x10^{-6}x44000x100^2}{180}$$

$$H = 3,35$$

6.7 - Overshoot

Overshoot: é a relação entre a maior amplitude de uma oscilação e o valor de regime permanente.

Assim, um sistema físico recebe uma dada excitação e sua resposta é um movimento oscilatório amortecido, conforme mostrado na figura, então o Overshoot é $(a - b)/b$.



Onde:

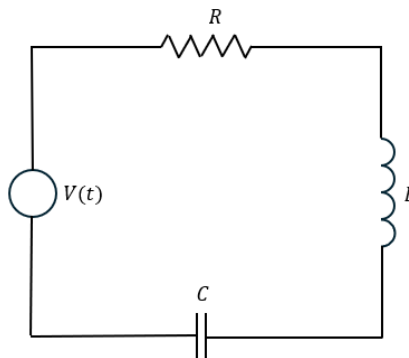
- a - valor máximo atingido durante a oscilação
- b – Valor final em regime permanente

6.8 - Função de Transferência

Considerando um sistema físico qualquer, define-se função de transferência deste sistema, como sendo a relação entre a transformada de Laplace da variável de saída e a transformada de Laplace de variável de entrada, admitindo-se condições iniciais nulas.

É importante salientar que o método de Transformada de Laplace só se aplica a sistemas lineares e que as características dinâmicas de um sistema linear são representadas por um grupo de equações diferenciais lineares.

Como exemplo de um sistema físico, podemos citar um circuito elétrico RLC série, excitado por uma fonte de tensão $v(t)$. Se desejarmos examinar o comportamento da carga "q" do capacitor, esta carga será para nós, a saída ou resposta do sistema. Vamos então determinar a função de transferência do sistema mostrado na figura.



Circuito RLC Série

Para se determinar a função de transferência de um sistema qualquer, devemos seguir as seguintes etapas:

- Montar a equação diferencial que governa o sistema.
- Determinar a transformada de Laplace dessa equação, considerando nulas todas as condições iniciais.
- Tornar a relação entre a transformada do sinal de saída e a do sinal de entrada, obtendo-se a função de transferência procurada.

No caso, a função de transferência procurada é:

$$F(s) = \frac{Q(s)}{V(s)}$$

A equação diferencial do circuito é:

$$V(t) = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int i dt$$

Como

$$i = \frac{dq}{dt}$$

a equação pode ser descrita:

$$V(t) = L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q(t)}{c}$$

Aplicando a transformada de Laplace, considerando nulas as condições iniciais, obtemos a equação que se segue:

$$V(s) = Ls^2Q(s) + RQ(s) + \frac{Q(s)}{c}$$

Assim:

$$\frac{Q(s)}{V(s)} = \frac{1}{Ls^2 + R + \frac{1}{c}}$$

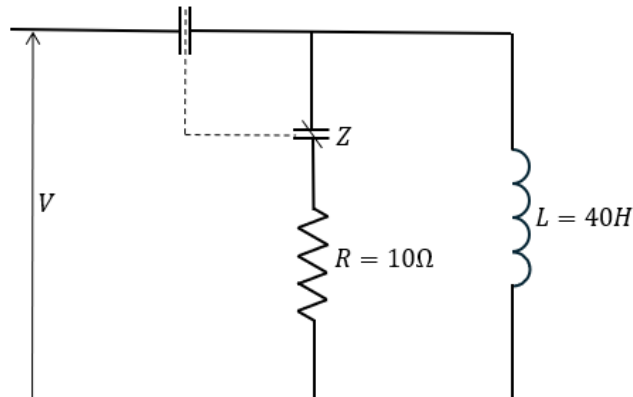
6.9 - Constante de Tempo (T)

Toda vez que um sistema físico que está em equilíbrio recebe uma excitação e tende para uma outra posição de equilíbrio em vez de ficar variando indefinidamente, observa-se que a expressão matemática que rege este comportamento é do tipo exponencial, sendo da forma:

$$y = y_0 e^{-at}$$

Por definição, constante de tempo é o valor do tempo t que torna $at = 1$.

Como exemplo, citamos um circuito elétrico, como indicado na figura onde o valor da constante de tempo para um circuito resistivo e indutivo é:



A constante de tempo é dada por:

$$T = \frac{L}{R} = \frac{40H}{10\Omega} = 4s$$

Isto significa que 4 segundos após a operação simultânea de abertura do contato 1 e fechamento do contato 2, o valor da corrente i será 0,37 vezes o valor da corrente i que circulava no instante de operação dos contatos.

Com efeito:

$$i = 10e^{-R/L T}$$

Então:

$$i = I_0 e^{-1}$$

Logo,

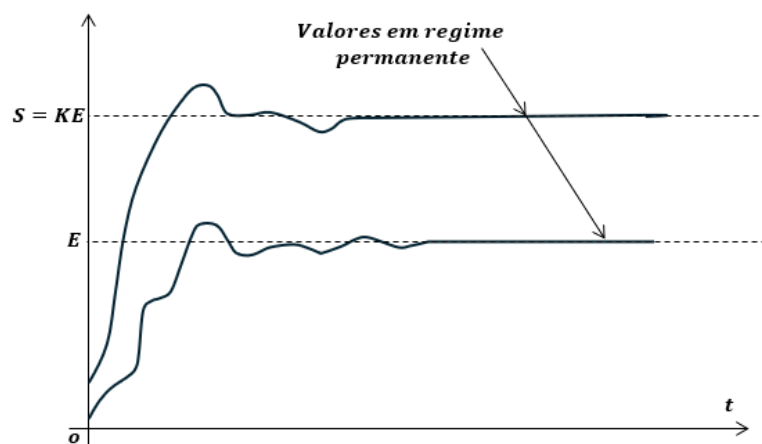
$$i = I_0 \frac{1}{e}$$

Onde,

$$i = 0,37 I_0$$

6.10 - Ganho (K)

O Ganho (K) é a relação entre os valores dos sinais de saída e o de entrada, considerando o sistema em regime permanente.



Resposta em regime permanente a entrada com valor de regime permanente constante

Após essas definições, vamos estabelecer os critérios de ajuste de um regulador de velocidade, considerando três casos distintos, ou seja:

- Operação em sistemas isolados ou com o objetivo de se facilitar a sincronizado em grandes sistemas interligados;
- Rejeição de carga;
- Operação em grandes sistemas interligados.

Para o primeiro caso, procura-se ajustar o regulador de modo a se obter, nos grandes sistemas interligados, condições mais favoráveis de sincronização e tomar os sistemas isolados, estáveis a uma nova solicitação de carga, tão rápido quanto possível. Assim a resposta dos valores da frequência da unidade, a uma variação de carga deve ser estabilizada no menor tempo possível e com um mínimo de "overshoot".

Para esta configuração, um dos critérios para se estabelecer os valores ótimos dos parâmetros do regulador é:

$$b_t = 1,5 \frac{T_w}{T_a}$$

$$T_d = 3 T_w$$

$$T_n = 0,5 T_w$$

Sendo que as faixas mais comuns entre os fabricantes são as seguintes:

- b_t : 0 a 100%
- T_d 0 a 20s
- T_n 0 a 10s

Para a análise dos ajustes do regulador, considerando uma rejeição de plena carga, a preocupação recai sobre a definição do tempo de fechamento das palhetas do distribuidor, de modo a conciliar os valores de sobrevelocidade com o aumento de pressão na caixa espiral e no conduto forçado. Isto porque a variação temporária da rotação da unidade e a variação instantânea de pressão na tubulação d'água dependem do tempo de fechamento das palhetas do distribuidor. Quanto mais rápido se fecham, tanto maior será o golpe de aríete que se forma no conduto forçado e na caixa espiral, com consequente encarecimento das chapas. Por outro lado, um aumento de fechamento das palhetas significa um aumento de sobrevelocidade da unidade, o que aumenta o custo de fabricação do rotor, para torná-lo resistente as forças centrífugas resultantes dessas altas velocidades.

Para se ajustar o tempo de fechamento das palhetas atua-se sobre os ajustes dos circuitos eletrônicos e sobre válvulas incluídas no circuito hidráulico. Isto porque a rejeição pode ser provocada pela abertura manual do disjuntor e neste caso o fechamento das palhetas será comandado pelo circuito eletrônico e com isto os ajustes definidos para o primeiro caso (operação em sistemas isolados), terão também de atender as exigências de sobrepressão e sobrevelocidade. Se a rejeição de carga for consequência de uma emergência na unidade, em que o solenoide de fechamento rápido será energizado e atuar diretamente sobre o circuito hidráulico, o tempo de fechamento das palhetas do distribuidor será conforme os ajustes das citadas válvulas.

Como exemplo, vamos supor uma unidade com:

- Potência nominal de 180 MVA
- Velocidade nominal de 100 rpm
- Sobrepressão tolerada de 30% na caixa espiral

Estabelecendo-se um tempo de fechamento das palhetas de 8 segundos, vamos determinar através de cálculos analíticos que não estão no escopo deste curso, o valor da sobrevelocidade a ser alcançada, em seguida a uma rejeição total da carga. Para tanto, é necessário o GD^2 natural, que significa o GD^2 de um gerador de construção mais econômica e em seguida acrescentar 5% referente ao GD^2 da turbina. Com este valor de GD^2 da unidade, mais o valor da velocidade e da potência nominais, determina-se o valor de:

$$T_a = 2H \text{ (inercia efetiva do rotor da máquina)}$$

E, finalmente, obtêm-se o valor da sobrevelocidade. Para essa unidade, com base nos valores nominais de potência e velocidade:

$$GD^2 = 44.000tm^2$$

que implica em um:

$$T_a = 2H = 3,35s$$

Para um tempo de fechamento de 8 segundos, a sobrevelocidade alcança o valor de 58%, o que não pode ser admitido. Para solucionar este problema um procedimento seria fixar a sobrevelocidade em 40% e, para isso, aumentar o valor de GD^2 ou diminuir o tempo de fechamento, admitindo maior sobrepressão. Nesta solução devem ser comparados o aumento do preço do gerador e com o da tubulação forçada.

Em grandes sistemas interligados, é critério geral que, se uma unidade opera satisfatoriamente em um sistema isolado, fatalmente operará da mesma forma em um sistema interligado. Esse critério supõe que as demais unidades do sistema estejam operando com características dinâmicas razoáveis ou que o sistema se estabilize rapidamente após variações de carga. Assim, os valores obtidos para ajuste no período de sincronização são próprios também para operação em carga da unidade.

Há, contudo, alguns fabricantes de regulador que dispõe de ajustes que se aplicam após o fechamento do disjuntor da unidade, ou seja, com a operação em carga, em sistemas interligados, com objetivo de estabelecer uma boa regulação, por mais desfavoráveis que sejam as condições de carga. Um dos critérios para se obter esses ajustes, seria o de tentativa durante o comissionamento da unidade.

6.11 - Exemplo Específico de um Fabricante:

- Ajustes para a fase de sincronização (disjuntor aberto) ou para operação, em sistemas isolados.

- bt : 0 a 90%, mesma faixa contínua
- T_d : 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 (segundos)

Ajustes para operação da unidade em carga em grandes sistemas interligados (disjuntor fechado).

- $bt = 4\%$ $T_d = 2s$
- $bt = 12\%$ $T_d = 3s$
- $bt = 24\%$ $T_d = 5s$
- $bt = 36\%$ $T_d = 7s$
- $bt = 60\%$ $T_d = 10s$

Assim, determinaríamos os ajustes para a fase de sincronização pelo método já citado e analisa-se o comportamento durante este período, assim como, quando se está operando em carga num sistema interligado, escolhe-se em que posição da chave a máquina apresenta melhor comportamento.

Como conclusão, apresentamos uma simulação num computador digital onde constam os dados referentes a unidade e aos ajustes do regulador de velocidade. A simulação consistiu em uma variação de 2% no Ajuste de Referência de Velocidade e no registro dos valores de frequência, potência mecânica, curso do distribuidor e velocidade de variação das palhetas do distribuidor.

Os ajustes foram definidos considerando operação em sistemas isolados ou para obter facilmente sincronização. Assim, estabelecemos:

$$bt = 1,5 \frac{T_w}{T_a} = 1,5 \frac{2,62}{6,68} = 0,6$$

$$T_d = 3T_w = 3 \times 2,62 = 8$$

$$T_n = 0,5T_w = 0,5 \times 2,62 = 1,3$$

Com estes ajustes definidos, consideramos a máquina operando num sistema com amortecimento 0,5, o que é um critério bastante conservativo e ainda assim, na análise dos valores de frequência observou-se um "Overshoot" de 20%, com uma estabilização de 12 segundos, o que caracteriza uma boa regulação. Para um sistema com amortecimento 2, que é um valor típico para o sistema elétrico do sudeste brasileiro, teríamos ainda, uma melhor regulação.

Observando-se o comportamento das grandezas impressas na listagem de computador, nota-se nas primeiras iterações, a brusca abertura do distribuidor, não só em resposta a variação na referência de velocidade, mas, principalmente, em consequência da queda dos valores de frequência e potência mecânica, tal qual descrito na análise de estatismo transitório.

Numa análise mais detalhada, observa-se ainda, que:

- Na primeira iteração obteve-se o maior deslocamento do curso do distribuidor, por ação do estatismo transitório como compensação a diminuição dos valores de frequência e potência mecânica;
- O valor de frequência se estabiliza de acordo com o definido no ajuste de referência de velocidade, ou seja, com 2% de acréscimo;
- O valor de potência mecânica se estabiliza coerentemente com a variação de frequência e com o amortecimento do sistema, no caso temos: $2\% \times 0,5 = 1\%$ de aumento de potência mecânica;
- A posição do distribuidor se estabiliza, da mesma forma que a potência mecânica, com 1% de variação positiva do curso.

7 - REFERÊNCIAS SOBRE O FUNCIONAMENTO DO SIN E ONS

Para complementar a bibliografia do seu documento com fontes oficiais e atualizadas sobre a operação do SIN e o papel do ONS, sugiro incluir as seguintes referências:

1. ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>

2. ONS. Procedimentos de Rede – Submódulo 1.1: O Operador Nacional do Sistema Elétrico e os Procedimentos de Rede.

<https://www.ons.org.br/ProcedimentosDeRede>

3. ONS. Plano da Operação Energética (PEN).

<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/planejamento-da-operacao>

4. ONS. Programa Mensal de Operação (PMO).

<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/programa-mensal-de-operacao>

5. ONS. História da operação do sistema interligado nacional. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade, 2003.

<https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes>

6. ONS. Relatório Anual.

<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/relatorios-anuais>

7. CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Custo Marginal de Operação (CMO).

<https://www.ccee.org.br>

8 - BIBLIOGRAFIA

Controle frequência - potência em sistemas elétricos - RUDOLF SAUER.

Power - System interconnections - NATHAN COHN