

2 Modelos de Carga

Inferring models from observations and studying their properties is really what science is about.

Lennart Ljung

Um modelo matemático de um sistema deve atender a um propósito e ser encarado com uma descrição boa e confiável de aspectos específicos do sistema e não como a descrição final e insofismável do mesmo. Se o fenômeno a ser modelado for de natureza não linear, este pode ser descrito por um modelo linear, obtendo-se resultados bons o suficiente para um determinado propósito [2].

Diversos estudos encontrados na literatura reportam benefícios de se modelar cargas com mais precisão nas simulações da operação e do planejamento do sistema. As redes elétricas de potência evoluíram para interconexões cada vez mais complexas, oferecendo novos desafios para otimizar a exploração dos seus recursos e prevenir problemas como colapsos de tensão, modos de oscilações inter-áreas e perdas de sincronismo entre unidades geradoras.

Neste capítulo, serão apresentados alguns modelos de carga utilizados ao longo das últimas décadas em estudos nos sistemas elétricos de potência.

2.1. Definição: o que é carga?

O termo “carga” assume diferentes significados, dependendo do contexto em que for usado, sendo as principais definições [3]:

- Um equipamento conectado ao sistema de potência que consome energia.
- A energia total consumida por todos os equipamentos conectados ao sistema de potência.

- Uma porção do sistema, que não é representada detalhadamente, mas é tratada como se fosse um único elemento consumidor de potência, conectado a um barramento.

Em especial, a última definição estabelece que, uma vez escolhido um barramento de carga, tudo que estiver conectado a jusante deste barramento está agregado num equivalente, classificado como carga e esta é medida em termos da potência consumida por este equivalente. A tensão elétrica medida no barramento de carga é definida como a variável de perturbação do fenômeno, ou a variável de entrada do modelo. Há modelos de carga que utilizam como variáveis de perturbação a frequência e a temperatura ambiente, de acordo com o propósito do modelo e o nível de detalhamento desejado.

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático que ilustra um exemplo de instalação de um medidor de qualidade de energia no lado de baixa dos transformadores de 230 / 69 kV do sistema CHESF. A carga “vista” a jusante do medidor de qualidade de energia inclui os bancos de capacitores para compensação de potência reativa, linhas do sistema de subtransmissão, alimentadores de distribuição primária e secundária, transformadores, e qualquer equipamento conectado a esta rede. Atualmente, a carga suprida pelos barramentos de 69 kV é representada com modelos estáticos polinomiais (seção 2.2.4) nos arquivos disponibilizados pelo ONS para simulações no ANATEM.

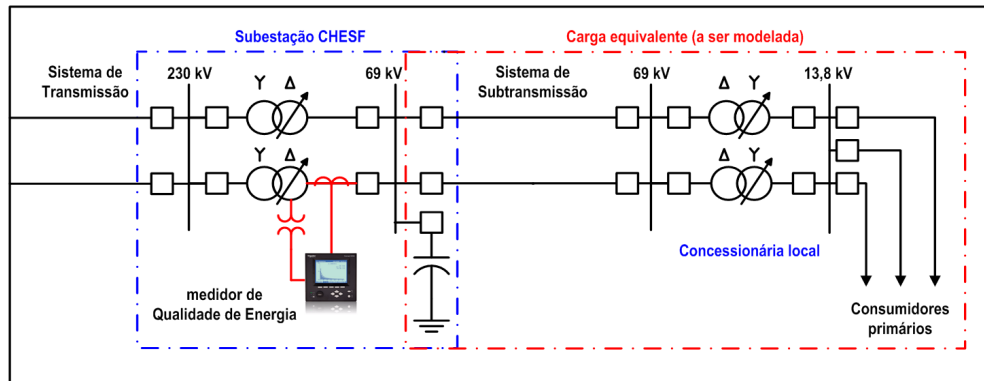


Figura 1 – Diagrama esquemático dos sistemas de transmissão e subtransmissão

A referência [4] organiza uma bibliografia de referências com propostas de modelos de carga utilizados em estudos de sistemas de potência, listando uma

série de exemplos destes modelos, separados em basicamente duas categorias: modelos estáticos e dinâmicos.

A referência [5] sustenta que o impacto de motores industriais no comportamento da carga na estabilidade do sistema pode ser mascarado com modelos estáticos. Consideração semelhante aparece em [6] – [11].

A seguir, serão apresentadas as três classificações mais comuns de modelos de carga encontradas na pesquisa bibliográfica: estáticos, dinâmicos e híbridos.

2.2. Modelos Estáticos

São modelos que expressam as potências ativa e reativa, em qualquer instante do tempo, em função da magnitude de tensão do barramento de carga e da frequência elétrica do sistema, naquele instante [3].

Quando ocorrem variações pequenas ou lentas de tensão e/ou frequência, o sistema retorna ao regime permanente rapidamente, e nestes casos é possível modelar a carga por modelos estáticos sem perda de generalidade.

A seguir, as representações mais comuns de modelos estáticos relacionando a potência somente em função das variações de magnitude de tensão:

2.2.1. Modelo Impedância Constante (Z)

O modelo impedância constante expressa a variação da potência proporcionalmente ao quadrado de desvios da tensão $V(k)$ de seu ponto de operação pré-distúrbio V_0 , como mostram as relações de (2-1).

$$\begin{aligned} P(k) &= P_0 \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^2 \\ Q(k) &= Q_0 \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^2 \end{aligned} \tag{2-1}$$

Onde:

- $P(k)$ é a potência ativa expressa na unidade megawatt (MW), em função da variável discreta de tempo k .
- $Q(k)$ é a potência reativa expressa na unidade megavar (MVar), em função da variável discreta de tempo k .
- $V(k)$ é a tensão elétrica expressa na unidade Volt (V), em função da variável discreta do tempo k .
- P_0 , Q_0 e V_0 são respectivamente os valores da potência ativa, reativa e tensão em regime permanente antes do distúrbio ou, matematicamente falando, o ponto de equilíbrio do sistema, ou ainda $P_0=P(k=0)$, $Q_0=Q(k=0)$ e $V_0=V(k=0)$.

O ONS adota este modelo de carga para simulações estáticas (fluxo de potência) e dinâmicas (transitórios eletromecânicos), para a potência reativa, e também para o modelo da potência ativa quando a relação $V(k)/V_0 < 0,7$ ocorre durante uma simulação de distúrbio no sistema. Em diversos artigos encontrados na pesquisa bibliográfica, incluindo [3], esta é considerada uma prática simplificadora demais.

2.2.2.

Modelo Corrente Constante (I)

O modelo corrente constante expressa variações na potência proporcionalmente a desvios de tensão, como mostram as relações de (2-2).

$$P(k) = P_0 \left(\frac{V(k)}{V_0} \right) \quad (2-2)$$

$$Q(k) = Q_0 \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)$$

Em [3] é relatado que em análises de estabilidade a pequenos sinais [12] este modelo é utilizado para representar $P(k)$ e a potência reativa $Q(k)$ é representada por um modelo de impedância constante.

2.2.3. Modelo Potência Constante (P)

O modelo potência constante expressa a variação de potência independente de variações de tensão, como mostram as relações de (2-3), para qualquer instante k :

$$\begin{aligned} P(k) &= P_0 \\ Q(k) &= Q_0 \end{aligned} \tag{2-3}$$

2.2.4. Modelo polinomial (ZIP)

O modelo mais conhecido para caracterizar o comportamento estático de cargas, largamente empregado em estudos de fluxo de potência e de estabilidade de tensão, é o modelo ZIP, apresentado nas relações matemáticas (2-4).

O significado físico deste modelo associa o comportamento da potência que flui para a carga como uma composição de 3 parcelas: uma parcela da carga representada por um modelo de impedância constante (a parcela α_* da potência, proporcional ao quadrado da tensão), uma parcela do modelo de corrente constante (a parcela β_* da potência, diretamente proporcional à tensão) e uma parcela de potência constante (a parcela γ_* da potência, que não varia com a tensão).

Assim, (2-4) representam a potências ativa (P) e reativa (Q) em função de desvios da Tensão (V) de seus valores iniciais de operação (V_0) ao longo do tempo k , estabelecendo uma relação não linear entre essas grandezas.

$$\begin{aligned} P(k) &= P_0 \left[\alpha_{zp} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^2 + \beta_{ip} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right) + \gamma_{pp} \right] \\ Q(k) &= Q_0 \left[\alpha_{zq} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^2 + \beta_{iq} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right) + \gamma_{pq} \right] \end{aligned} \tag{2-4}$$

O conjunto de parâmetros a ser estimado é $\theta = [\alpha_*, \beta_*, \gamma_*]$, que, como visto anteriormente, representa respectivamente os percentuais de impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P) da composição da carga; estes parâmetros estão sujeitos à seguinte restrição:

$$\alpha_* + \beta_* + \gamma_* = 1 \text{ ou } \gamma_* = 1 - \alpha_* - \beta_* \quad (2-5)$$

Em resumo, o conjunto de parâmetros a ser estimado para os modelos de (2-4) são $\theta_p = [\alpha_{zp}, \beta_{ip}]$ e $\theta_q = [\alpha_{zq}, \beta_{iq}]$, respectivamente para potência ativa e reativa, dada a simplificação de (2-5).

No sub-módulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do ONS [1], ao serem definidas as diretrizes para estudos de estabilidade eletromecânica, em relação à modelagem de carga, está escrito no item 8.2.10: “Se não houver informações para representação da carga em função da tensão, deve-se representá-la como 50% de potência constante e 50% de impedância constante para a parte ativa, e como 100% de impedância constante para a parte reativa”.

2.2.5. Modelo exponencial

Este modelo não tem significado físico, diferentemente do modelo polinomial ZIP apresentado anteriormente. As equações (2-6) relacionam respectivamente as potências ativa e reativa como funções não-lineares das variações de tensão que ocorrem no sistema.

$$\begin{aligned} P(k) &= P_0 \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^{np} \\ Q(k) &= Q_0 \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^{nq} \end{aligned} \quad (2-6)$$

Os parâmetros a serem estimados são np e nq , que podem assumir, segundo o compêndio apresentado em [4], valores numa faixa de $np=[0.72; 1.3]$ e $nq=[2.96; 4.38]$ para cargas tipicamente residenciais, $np=[0.99; 1.51]$ e $nq=[3.15;$

3.95] para cargas tipicamente comerciais e $np=0.18$ e $nq=6$ para cargas tipicamente industriais.

2.3. Modelos Dinâmicos

São modelos que expressam as potências ativa e reativa, em qualquer instante do tempo, em função da magnitude de tensão do barramento de carga e da frequência elétrica do sistema naquele instante e nos instantes anteriores [3].

Equações diferenciais são utilizadas para modelagem no domínio do tempo contínuo, enquanto equações a diferenças são utilizadas para modelagem no domínio do tempo discreto.

2.3.1. Motor de Indução

É a representação mais comum de modelagem da dinâmica de cargas, assumindo que os motores são os componentes que predominam nos sistemas elétricos de potência, com percentuais estimados em até 70 % do total de energia consumida pelos barramentos de carga.

A maioria dos aplicativos computacionais de simulações dinâmicas disponibiliza modelos de motor de indução para representação de cargas dinâmicas, onde o usuário preenche os parâmetros de impedância do estator (R_s e X_s), do rotor (R_r e X_r) e a reatância de magnetização (X_m) do motor de indução (Figura 2). Todas as quantidades se referem ao lado do estator e as correntes são representadas com a convenção de carga [12].

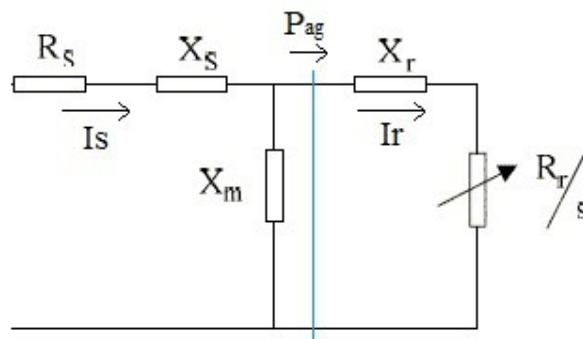


Figura 2 – Circuito equivalente estático do motor de indução

As equações do motor de indução, conforme apresentado em [8], são as seguintes:

$$\frac{\partial^2 \theta_r}{\partial t^2} = \frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{1}{2H} [T_m - T_e] = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_o - (E'_d I_d + E'_q I_q)]$$

$$\frac{\partial E'_q}{\partial t} = -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (\omega - 1)E'_d \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial E'_d}{\partial t} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q$$

$$I_d = \frac{1}{(R_s^2 + X'^2)} [(U_d - E'_d)R_s + X'(U_q - E'_q)] \quad (2-9)$$

$$I_q = \frac{1}{(R_s^2 + X'^2)} [(U_q - E'_q)R_s - X'(U_d - E'_d)]$$

$$T' = \frac{X_r + X_m}{R_r} \quad (2-10)$$

$$X = X_s + X_m \quad (2-11)$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} \quad (2-12)$$

$$A + B + C = 1 \quad (2-13)$$

$$P_{ag} = \frac{R_r}{s} I_r^2 = P_{sh} + P_{loss} \Rightarrow P_{sh} = \frac{R_r}{s} I_r^2 - R_r I_r^2 \quad (2-14)$$

$$P_{mot} = U_d I_d + U_q I_q \quad (2-15)$$

$$Q_{mot} = U_d I_q - U_q I_d$$

Onde:

- $s = \omega -$ “escorregamento”, razão entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona” ω_r / ω_s (p.u.).
- θ_r – posição angular do rotor em relação à referência síncrona (rad).
- ω_s – velocidade angular síncrona (rad/s).
- ω_r – velocidade angular do rotor (rad/s).

- R_s e X_s – Resistência e reatância do enrolamento do estator (p.u.).
- R_r e X_r – Resistência e reatância do enrolamento do rotor (p.u.).
- X_m – Reatância de magnetização do motor (p.u.).
- H – Constante de Inércia do rotor do motor.
- A – Coeficiente de torque proporcional ao quadrado de ω .
- B – Coeficiente de torque diretamente proporcional à ω .
- C – Coeficiente de torque constante.
- T_o – Torque em regime permanente.
- T' – Constante de tempo de circuito aberto transitória (rad).
- I_d e I_q – Correntes de eixo direto e eixo em quadratura do estator.
- U_d e U_q – Tensões de eixo direto e eixo em quadratura do estator.
- E'_d e E'_q – Força Eletromotriz transitória de eixo direto e eixo em quadratura.
- X' – Reatância transitória do motor de indução.
- P_{ag} – Potência ativa transferida pelo gap para o rotor.
- P_{sh} – Potência mecânica transferida para o eixo.

As relações (2-7) são idênticas, descrevendo a relação de aceleração do rotor devido ao desbalanço entre os torques eletromagnético e mecânico do motor. As relações (2-8) e (2-9) representam a dinâmica do circuito do rotor, que expressam o decaimento do fluxo magnético do mesmo. A relação (2-10) caracteriza o decaimento dos transitórios do rotor quando o estator está em vazio. A relação (2-14) representa a potência ativa transferida pelo *gap* do rotor e sua relação com a potência mecânica transferida para o eixo e a perda na resistência do rotor [12], enquanto (2-15) apresenta os modelos de potência ativa e reativa P_{mot} e Q_{mot} em função das tensões e correntes de eixo direto e quadratura.

É necessário utilizar métodos numéricos de integração para resolver estas equações diferenciais ordinárias não-lineares, tais como Euler ou Runge-Kutta.

O conjunto de parâmetros a ser estimado é $\theta = [R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, H, A, B]$.

2.3.2. Modelo Autorregressivo MISO

O modelo autorregressivo é uma das representações mais simples para sistemas dinâmicos [2]. As equações (2-16) são estruturas MISO (*Multiple-Input Single-Output*), onde a única saída é a potência (ativa ou reativa) e esta saída é função de mais de uma variável.

As equações (2-16) foram extraídas de [4] e basicamente explicitam uma relação linear e causal entre a potência e variações de tensão e frequência:

$$\begin{aligned}
 P(k) &= \sum_{m=1}^{NPP} \alpha_{mp} \cdot P(k-m) + \sum_{m=0}^{NPV} \beta_{mp} \cdot V(k-m) + \sum_{m=0}^{NPF} \chi_{mp} \cdot f(k-m) + \sum_{m=0}^{NPE} \kappa_{mp} \cdot e(k-m) \\
 Q(k) &= \sum_{m=1}^{NQQ} \alpha_{mq} \cdot Q(k-m) + \sum_{m=0}^{NQV} \beta_{mq} \cdot V(k-m) + \sum_{m=0}^{NQF} \chi_{mq} \cdot f(k-m) + \sum_{m=0}^{NQE} \kappa_{mq} \cdot e(k-m)
 \end{aligned}
 \tag{2-16}$$

- $P(k)$ e $Q(k)$ – são as leituras de potência ativa e reativa para os diversos instantes k .
- $V(k)$ – são as leituras de tensão no barramento de carga para os diversos instantes k .
- $f(k)$ – são as leituras da frequência elétrica do sistema para os diversos instantes k .
- $e(k)$ – são as variáveis não observáveis, ou erros de medição, uma sequência de variáveis gaussianas com média zero.
- α_* , β_* , χ_* , κ_* – São os coeficientes regressivos das grandezas definidas acima.
- NPP , NPV , NPF , NPE , NQQ , NQV , NQF , NQE – são a ordem de regressão de cada uma das variáveis.

De acordo com (2-16), para o modelo da potência ativa o conjunto de parâmetros a ser estimado é $\theta_p = [\alpha_{1p}, \dots, \alpha_{NPPp}, \beta_{0p}, \dots, \beta_{NPVp}, \chi_{0p}, \dots, \chi_{NPFp}, \kappa_{0p}, \dots, \kappa_{NPEp}]$, e para a potência reativa é $\theta_q = [\alpha_{1q}, \dots, \alpha_{NQQq}, \beta_{0q}, \dots, \beta_{NQVq}, \chi_{0q}, \dots, \chi_{NQFq}, \kappa_{0q}, \dots, \kappa_{NQEq}]$.

2.3.3. Modelo Autorregressivo SISO

Uma estrutura SISO (*Single-Input Single-Output*) simplifica consideravelmente o modelo, reduzindo o número de parâmetros a serem estimados para caracterizar a dinâmica da carga. Pode-se observar pelas equações (2-17) que variações de tensão produzem variações de potência, cuja dinâmica é traduzida matematicamente como um sistema linear e causal.

$$\begin{aligned}
 P(k) &= \sum_{m=1}^{NPP} \alpha_{mp} \cdot P(k-m) + \sum_{m=0}^{NPV} \beta_{mp} \cdot V(k-m) \\
 Q(k) &= \sum_{m=1}^{NQQ} \alpha_{mq} \cdot Q(k-m) + \sum_{m=0}^{NQV} \beta_{mq} \cdot V(k-m)
 \end{aligned}
 \tag{2-17}$$

A consequência imediata desta redução de variáveis é a redução do conjunto de parâmetros a serem estimados; para o modelo da potência ativa, o conjunto de parâmetros a ser estimado é $\theta_p = [\alpha_{1p}, \dots, \alpha_{NPPp}, \beta_{0p}, \dots, \beta_{NPVp}]$, enquanto para a potência reativa, o conjunto é $\theta_q = [\alpha_{1q}, \dots, \alpha_{NQQq}, \beta_{0q}, \dots, \beta_{NQVq}]$.

2.4. Modelos Híbridos

Uma prática cada vez mais comum ([6], [7], [10] e [11]) é a representação da carga por um modelo híbrido, composto por uma parcela estática e outra parcela dinâmica.

Em [6], foram comparados os seguintes modelos híbridos:

2.4.1. ZIP + Equações a diferenças

Esta estrutura híbrida é uma soma de uma parcela da potência dada por um modelo polinomial de segunda ordem, também conhecido como ZIP (estático), com uma parcela da potência dada por um modelo de equações a diferenças (dinâmico). A parcela dinâmica é semelhante a (2-17), exceto pelas parcelas

proporcionais ao quadrado dos desvios de tensão, que caracterizam a não-linearidade do modelo (2-18), assim como o termo quadrático do modelo ZIP.

$$\begin{aligned}
 P(k) &= aP_{ZIP} + bP_{DFE} \\
 &= aP_0 \left[a_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_p \right] \\
 &\quad + b \left[\begin{aligned} &a_{p1} \Delta P(k-1) + a_{p2} \Delta P(k-2) \\ &+ c_{p0} \Delta V(k) + c_{p1} \Delta V(k-1) + c_{p2} \Delta V(k-2) \\ &+ d_{p0} \Delta V^2(k) + d_{p1} \Delta V^2(k-1) + d_{p2} \Delta V^2(k-2) \end{aligned} \right] \quad (2-18)
 \end{aligned}$$

O conjunto de parâmetros a ser estimado para o modelo híbrido de potência descrito em (2-18) é $\theta_* = [a, a_p, b_p, c_p, b, a_{p1}, a_{p2}, c_{p0}, c_{p1}, c_{p2}, d_{p0}, d_{p1}, d_{p2}]$; os parâmetros a_p, b_p, c_p são idênticos aos definidos na seção 2.2.4 em letras gregas, e representam os parâmetros da parcela estática. Os parâmetros a, b são respectivamente os percentuais da parcela estática e dinâmica do modelo híbrido e atendem a restrição $a + b = 1$, ou $b = 1 - a$.

2.4.2. Exponencial + Motor de Indução

$$P = aP_{EXP} + bP_{MOT} = aP_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{P_v} + b(v_d i_d + v_q i_q) \quad (2-19)$$

O conjunto de parâmetros a ser estimado é $\theta_* = [a, b, P_v]$, além dos parâmetros listados ao final da seção 2.3.1, implícitos na soma do produto da tensão e corrente de eixo direto v_d e i_d com o produto da tensão e corrente de eixo em quadratura v_q e i_q . Mais uma vez, pode-se definir $b=1 - a$, reduzindo um dos parâmetros de θ_* . Para o modelo da potência reativa, a relação (2-15) de Q_{mot} iria substituir a segunda parcela do modelo, ponderada por b .

2.4.3. Exponencial + Equações a diferenças

$$\begin{aligned}
 P(k) &= aP_{EXP} + bP_{DFE} \\
 &= aP_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{P_v} \\
 &+ b \left[\begin{aligned} &a_{p1}\Delta P(k-1) + a_{p2}\Delta P(k-2) \\ &+ c_{p0}\Delta V(k) + c_{p1}\Delta V(k-1) + c_{p2}\Delta V(k-2) \\ &+ d_{p0}\Delta V^2(k) + d_{p1}\Delta V^2(k-1) + d_{p2}\Delta V^2(k-2) \end{aligned} \right] \quad (2-20)
 \end{aligned}$$

O conjunto de parâmetros a ser estimado é $\theta_*' = [a, b, P_v, a_{p1}, a_{p2}, c_{p0}, c_{p1}, c_{p2}, d_{p0}, d_{p1}, d_{p2}]$ para o modelo híbrido em (2-20).

2.4.4. ZIP + Motor de Indução

A modelagem mais comum desta abordagem híbrida é o modelo ZIP + motor de indução, como mostra a Figura 3, extraída de [8]. A sua popularidade se deve à disponibilidade destes dois modelos na maioria dos aplicativos computacionais de simulação do sistema de potência disponíveis, além de carregar significado físico.

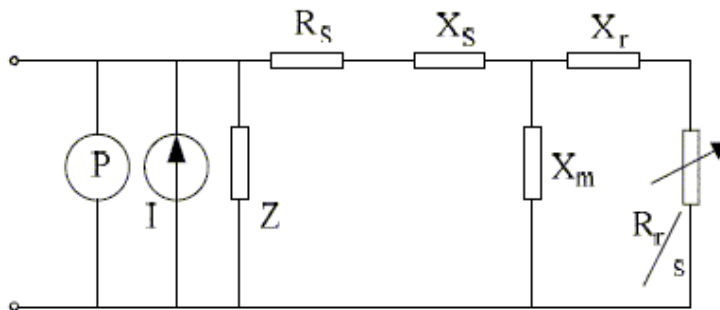


Figura 3 - Modelo Híbrido ZIP + motor de indução

As equações resultantes são:

$$\begin{aligned}
 P(k) &= \mu_P P_{ZIP}(k) + (1 - \mu_P) P_{MOT}(k) \\
 Q(k) &= \mu_Q Q_{ZIP}(k) + (1 - \mu_Q) Q_{MOT}(k) \quad (2-21)
 \end{aligned}$$

O conjunto de parâmetros a ser estimado é $\theta_* = [\mu, R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, H, A, B, \alpha_*, \beta_*]$, variáveis definidas nas seções 2.2.4 e 2.3.1 e μ_* corresponde à parcela estática do modelo.

2.5. Modelos MISO (*Multiple-Input Single-Output*)

Assim como (2-16) apresentou uma formulação envolvendo três variáveis de entrada e uma variável de saída, há outros exemplos encontrados na literatura, que relacionam variações de potência com variações na magnitude e na frequência do sinal de tensão.

A maior dificuldade prática, no entanto, consiste na incerteza quanto à medição de frequência, nem sempre disponível nos medidores, ou ainda com a leitura da mesma mascarada por ruídos ou mesmo limitação ou má calibração dos transdutores envolvidos na medição.

2.5.1. Modelo Polinomial em Função de Desvios de Frequência

A formulação mais geral de (2-4) incorpora a dependência da carga com os desvios de frequência elétrica, conforme (2-22), extraídas de [3]:

$$\begin{aligned} P(k) &= P_0 \left[\alpha_{zp} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^2 + \beta_{ip} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right) + \gamma_{pp} \right] \left[1 + K_{pf} \Delta f(k) \right] \\ Q(k) &= Q_0 \left[\alpha_{zq} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^2 + \beta_{iq} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right) + \gamma_{pq} \right] \left[1 + K_{qf} \Delta f(k) \right] \end{aligned} \quad (2-22)$$

Onde os conjuntos de parâmetros a serem estimados são $\theta_P = [\alpha_{zp}, \beta_{ip}, K_{pf}]$ e $\theta_Q = [\alpha_{zq}, \beta_{iq}, K_{qf}]$ para os modelos da potência ativa e reativa.

$\Delta f(k)$ é o desvio da frequência elétrica do sistema, no instante de tempo k , em relação ao seu valor f_0 pré-distúrbio.

2.5.2.

Modelo Exponencial em Função de Desvios de Frequência

Os desvios de frequência elétrica $\Delta f(k)$ podem ser computados calculando-se a derivada, em relação ao tempo, da variação do ângulo do fasor de tensão elétrica no barramento de carga. Há diversas técnicas para cálculo da frequência quando esta não é medida diretamente por um equipamento de medição.

$$\begin{aligned}
 P(k) &= P_0 \left[\frac{V(k)}{V_0} \right]^{np1} \left[1 + K_{pf1} \Delta f(k) \right] + P_0 \left[\frac{V(k)}{V_0} \right]^{np2} \\
 Q(k) &= Q_0 \left[\frac{V(k)}{V_0} \right]^{nq1} \left[1 + K_{Qf1} \Delta f(k) \right] + Q_0 \left[\frac{V(k)}{V_0} \right]^{nq2} \left[1 + K_{Qf2} \Delta f(k) \right]
 \end{aligned}
 \tag{2-23}$$

Foi extraída de [3] este modelo da potência ativa $P(k)$ formulado em (2-23) tem uma parcela dependente da frequência e outra, independente, caracterizando, assim, um modelo híbrido, onde a parcela dependente da frequência f representa um comportamento dinâmico da carga. Os parâmetros a serem estimados para este modelo são $[n_{p1}, n_{p2}, K_{pf1}]$.

Já no modelo da potência reativa $Q(k)$ de (2-23), o segundo termo representa a compensação reativa e as perdas no sistema de transmissão, e ambos os termos são proporcionais a desvios de tensão e frequência de seus valores pré-distúrbio. Os parâmetros a serem estimados para este modelo são $[n_{q1}, n_{q2}, K_{Qf1}, K_{Qf2}]$.

2.6.

Sumário do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados alguns modelos de cargas usados em simulações de sistemas elétricos de potência. Na maioria das publicações pesquisadas, os modelos representavam cargas em função de variações de tensão.

No próximo capítulo será apresentada uma metodologia de modelagem de carga baseada em medições, adaptando um modelo desprovido de significado físico, objetivando uma flexibilidade maior para representar modelos de carga, utilizando medições de contingências registradas nestes barramentos.