

基于能量函数法的电网暂态稳定性分析

汪小明¹, 刘涤尘¹, 吴军¹, 黄涌², 云雷¹, 赵红生², 汪如松¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 华中电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430077)

Energy Function-Based Power System Transient Stability Analysis

WANG Xiaoming¹, LIU Dichen¹, WU Jun¹, HUANG Yong², YUN Lei¹, ZHAO Hongsheng², WANG Rusong¹

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Central China Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Based on energy function, a practicable dynamic model for power system transient stability analysis, which possesses satisfied accuracy, is proposed. Through the equivalence of two regions, a 2-machine system is built and utilizing rotor acceleration equation an equivalent single-machine infinite bus system is achieved. Based on this model, equivalent transient energy function is constructed to calculate critical energy after the new stable equilibrium point is solved. System stability can be judged by two manners, namely the comparison of transient energy with critical energy and stability region, and by means of power system analysis software package (PSASP) the conclusion can be verified. Simulation results show that the energy function based on the new dynamic model possesses satisfied accuracy and can reflect transient stability behavior of power system.

KEY WORDS: dynamic model; energy function; stability region; transient stability

摘要: 为将能量函数更好地应用于工程实践, 提出了一种适用于暂态稳定分析的具有良好精度的动态实用模型。该模型通过区域等值构造2机等值系统后, 利用转子加速度方程得到等效单机无穷大系统。基于此模型构造等效暂态能量函数, 求解新的稳定平衡点后计算出临界能量。通过暂态能量与临界能量的比较以及稳定域2种方式可判断系统稳定性, 并通过PSASP对相关结论进行验证。仿真结果表明, 基于新的动态模型而构造的能量函数具有良好的精度, 较好地反映了系统的暂态稳定特性。

关键词: 动态模型; 能量函数; 稳定域; 暂态稳定

0 引言

现代电力系统常处于暂态安全稳定约束的边缘, 国内外电力系统稳定破坏事故统计表明, 暂态

稳定破坏的事故率居于首位, 暂态稳定分析成为动态安全评定的主体^[1-2]。随着研究的深入, 一方面新的理论不断引入暂态稳定分析中, 文献[3]将风险理论引入暂态稳定分析中; 另一方面暂态稳定分析的应用面进一步扩展, 文献[4]将暂态稳定分析并入最优潮流分析。在新的交直流混合输电网架结构下, 大电网暂态稳定分析将更为复杂^[5]。

能量函数简单、直观, 物理意义易于理解, 对于一个给定的平衡点, 对应的能量函数是惟一的^[6]。历经半个多世纪的研究, 尽管能量函数的构建、稳定域的求解方法等方面都取得了很大的进展, 并趋于实用化, 但其分析结果仍然存在一定误差。目前得到公认的暂态能量函数法主要有基于稳定边界的主导不稳定平衡点法、势能边界法(potential energy boundary surface, PEBS)、扩展等面积法(extended equal area criteria, EEAC)、混合法^[7]。

其中EEAC法通过故障后机群分组等值成单机无穷大系统并利用等面积法则进行评定。该方法的突出优点是计算速度快, 且避免了构造多机系统能量函数。但其依赖于能否正确识别临界机群, 当机组同调性差时会有较大误差。其模型采用经典模型, 并用理论等值方法, 求解工作量大且模型精度不高^[8], 因此对EEAC法可以从改善模型精度与避免同调机群识别制约的方向进一步研究。

构造能量函数的等值模型一直是研究的难点^[9-11], 目前得到应用的多是基于2阶发电机模型和恒定阻抗静态负荷的经典模型。经典模型不能良好地反映扰动中及扰动后系统的动态特性, 基于它而构造的能量函数具有较大误差, 在工程应用上遇到瓶颈。

本文依据潮流流向进行断面划分, 通过电压稳定分析选择断面上电压灵敏度最高的输电线路作

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077103)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077103).

为观测线路,以此为基准进行2区域动态等值,得到等效单机无穷大系统;然后利用积分法构造相应的暂态能量函数,通过暂态能量与临界能量的比较以及稳定域2种方式判断系统的暂态稳定性。

1 动态等值模型

1.1 动态负荷模型

不同的负荷特性会对电力系统的暂态稳定分析带来较大影响,特别是在临界情况下,计算的结果可能会有质的区别^[12-13]。目前负荷模型中比较常用的感应电动机加静态负荷模型一般情况下能够较好地适用于暂态稳定分析,但是利用此模型构造能量函数则很困难,不利于工程应用。

由转子运动方程可知,暂态稳定分析所关注的问题是功角稳定,当电力系统受到大扰动时,发电机的输入机械功率和输出电磁功率失去平衡,引起发电机转速和转子角的变化,各机组间发生相对摇摆。如果这种摇摆不能平息,系统将失步,即失去暂态稳定^[14]。因此应用于暂态能量函数的等值模型应该注重以下2个方面:1)功率平衡;2)模型中等效机械功率和等效电磁功率精确度。文献[15]经过对比分析后指出负荷建模的3类测量变量,即发电机相对功角、联络线功率以及枢纽节点电压,其中发电机相对功角和联络线功率的灵敏度大、辨识精度高,更适合作为负荷建模的测量变量。但是由于发电机的相对功角获取较为困难,在建模过程中一般选择联络线功率和节点电压作为测量变量,其中节点电压需要选择灵敏度较高,即电压变化率较大的节点作为观测点。

图1为区间潮流平衡示意图,通过区间联络线(如联络线4、5、6)功率动态特性可以实时反映外部系统对B区域系统的影响。

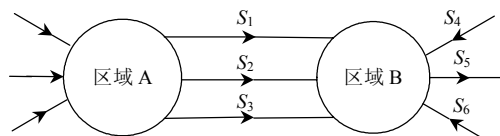


图1 等效系统潮流流向

Fig. 1 Direction of energy flow in equivalent system

为了得到区域B的等效负荷,应该经过如下处理(区域A类似):

1) 根据观测断面(图1中线路1-3)静态电压特性选取电压灵敏度最高的线路(如线路2)为观测线路,在模型中予以保留。

2) 对B系统而言,该模型中有功率输入的观

测线路(线路1、2、3、4、6)等效为电源,而有功率输出联络线(线路5)等效为负荷,在等值负荷中应该分别减去和加上相应部分并将其虚拟断开(观测线路予以保留)。按图1中假定流向可得

$$S_{Leq} = S_L + S_5 - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_6 \quad (1)$$

式中: S_{Leq} 为系统等效负荷; S_L 为系统实际负荷,其余为联络线传输功率。

对实际负荷 S_L 使用差分方程负荷模型^[16-17],采用线性激活函数的2层前馈网络(简称简化或线性前馈网络)建立动态模型

$$Y(k) = a_{y1}Y(k-1) + a_{y2}Y(k-2) + b_{u0}U(k) + b_{u1}U(k-1) + b_{u2}U(k-2) \quad (2)$$

式中: $Y(k)$ 为有功 $P(k)/P_0$ 或无功 $Q(k)/Q_0$; P_0 、 Q_0 分别为扰动前稳态有功和无功; $U(k)$ 为实测值与初始值的比值。取动态负荷模型参数为: $a_{y1}=0.9027$, $a_{y2}=-0.4306$, $b_{u0}=0.7806$, $b_{u1}=0.2012$, $b_{u2}=0.0732$ 。

1.2 动态发电机模型

采用动态负荷后可得实时的动态等值阻抗,利用观测线路母线的电压实时值得等效发电机暂态电势实时值,表征出区域发电机群的动态特性。发电机参数求取方法有发电机参数采用加权聚合法进行等值,如图2所示。

$$\begin{cases} M_{eq} = \sum_{i=1}^n M_i \\ X'_d = (X'_{d1}{}^{-1} + X'_{d2}{}^{-1} \dots + X'_{dn}{}^{-1})^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_{eq} 为等效时间常数; M_i 为第 i 台发电机时间常数; X'_d 为等效暂态电抗; X'_{dn} 为第 n 台发电机暂态电抗,以上各值均为常量。上述参数可由PSASP基础数据库查询,然后利用该公式求解。

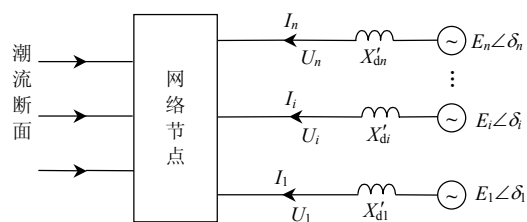


图2 发电机并联等效示意图

Fig. 2 Equivalent parallel generators schematic

利用端口电势电压关系式可以求取

$$E' = U + jI_G X'_d \quad (4)$$

式中: E' 为等效发电机暂态电势,为动态值; U 为观测母线端口电压,为实测动态值; I_G 为机端电流推算动态值; X'_d 为等效暂态电抗,常量。

尽管实际系统可能存在多台发电机,但只要发电机基本同步,就可以等效为一台机。

1.3 2 机等值模型

对图 1 中区域 A 和区域 B 按照前述方法进行动态等值之后, 对观测线路采用 π 型等值后可以得到 2 机等值模型, 如图 3 所示。

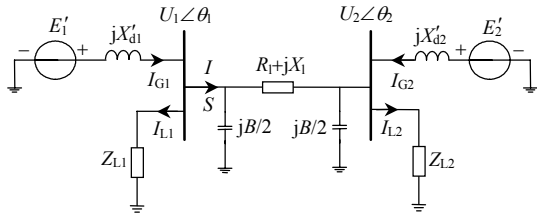


图 3 2 机等值系统模型

Fig. 3 Model of two machine system

模型中线路阻抗参数为恒定值, 发电机暂态电抗为恒定值; 发电机暂态电势与等效负荷阻抗为动态值; 母线电压及联络线电流、功率为实测值; 等效负荷电流及机端电流为推算动态值。

2 等值模型下的暂态能量函数

暂态稳定分析主要研究发电机转子的摇摆特性, 主要和网络的工频分量相关, 故发电机可以采用忽略定子暂态的实用模型。在发电机内节点将电压源 $E' \angle \delta$ 串联接入网络, 发电机节点延伸至内电势节点, 暂态电抗成为网络的一部分, 负荷以并联接地支路形式接在负荷节点, 求得基于发电机内节点的增广导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_i (d^2 \delta_i / dt^2) = P_{mi} - P_{ei}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

由式(6)可得

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \frac{P_{m1} - P_{e1}}{M_1} - \frac{P_{m2} - P_{e2}}{M_2} \quad (7)$$

式中: P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; M 为惯性时间常数, 两机的相对转子角用 $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 表示, $M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$ 同乘式(7)两端可得

$$M_{eq} (d^2 \delta / dt^2) = P_m - P_e \quad (8)$$

式中: $M_{eq} = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$; $P_m = (M_2 P_{m1} - M_1 P_{m2}) / (M_1 + M_2)$; $P_e = (M_2 P_{e1} - M_1 P_{e2}) / (M_1 + M_2)$ 。

设 $\dot{E}'_i = E'_i \angle \delta_i$, $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = Y_{ij} \angle \phi_{ij}$, 则 $G_{ij} = Y_{ij} \cos \phi_{ij}$, $B_{ij} = Y_{ij} \sin \phi_{ij}$, 则有

$$\begin{cases} P_{e1} = E_1'^2 G_{11} + E_1' E_2' Y_{12} \cos[\phi_{12} - (\delta_1 - \delta_2)] \\ P_{e2} = E_2'^2 G_{22} + E_1' E_2' Y_{21} \cos[\phi_{21} - (\delta_2 - \delta_1)] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Y_{12} = Y_{21}$, $\phi_{12} = \phi_{21}$, $\delta = \delta_1 - \delta_2$, 可得

$$\begin{cases} P_{e1} = E_1'^2 G_{11} + E_1' E_2' Y_{12} \cos(\phi_{12} - \delta) \\ P_{e2} = E_2'^2 G_{22} + E_1' E_2' Y_{21} \cos(\phi_{21} + \delta) \end{cases} \quad (10)$$

由于

$$P_e = (M_2 P_{e1} - M_1 P_{e2}) / (M_1 + M_2) \quad (11)$$

$$(M_2 E_1'^2 G_{11} - M_1 E_2'^2 G_{22}) / (M_1 + M_2) + E_1' E_2' Y_{12} \cdot$$

$$\sin \phi_{12} [\sin \delta - (M_1 - M_2) / (M_1 + M_2) \cos \delta \cot \phi_{12}] \quad (12)$$

令

$$\cot(\gamma + 90^\circ) = -\frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \cot \phi_{12}$$

则

$$E_1' E_2' Y_{12} \sin \phi_{12} (\sin \delta - \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \cos \delta \cot \phi_{12}) =$$

$$E_1' E_2' Y_{12} \frac{\sin \phi_{12}}{\sin(\gamma + 90^\circ)} \sin(\delta - \gamma) \quad (13)$$

式(13)化简后有

$$\frac{\sin \phi_{12}}{\sin(\gamma + 90^\circ)} = \frac{\sqrt{M_1^2 + M_2^2 - 2M_1 M_2 \cos 2\phi_{12}}}{M_1 + M_2} \quad (14)$$

进而可得

$$P_e = \frac{M_2 E_1'^2 G_{11} - M_1 E_1'^2 G_{22}}{M_1 + M_2} +$$

$$\frac{E_1' E_2' Y_{12} \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - 2M_1 M_2 \cos 2\phi_{12}}}{M_1 + M_2}.$$

$$\sin(\delta - \gamma) = P'_e + P_{em} \sin(\delta - \gamma) \quad (15)$$

式中 $\gamma = -\arccot(\frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \cot \phi_{12}) - 90^\circ$ 。

由式(15)可以得到等效的单机无穷大系统转子运动方程

$$M_{eq} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - [P'_e + P_{em} \sin(\delta - \gamma)] \quad (16)$$

对故障后的系统, 稳定平衡点即为 S(对应 δ_s), 不稳定平衡点为 U(对应 δ_u), 将式(16)写成故障后的形式(功率下标为 3, 即 P'_{e3} 、 P_{em3}), 有

$$M_{eq} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - [P'_{e3} + P_{em3} \sin(\delta - \gamma)] \quad (17)$$

令 $P'_m = P_m - P'_{e3}$, $\delta' = \delta - \gamma$, 则有

$$M_{eq} \frac{d^2 \delta'}{dt^2} = P'_m - P_{em3} \sin \delta' \quad (18)$$

从而可得 $\delta'_s = \arcsin \frac{P'_m}{P_{em3}}$, $\delta'_u = \pi - \delta'_s$ 。

$$\delta_s = \delta'_s + \gamma$$

$$\delta_u = \delta'_u + \gamma = \pi - \delta'_s + \gamma = \pi - \delta_s + 2\gamma \quad (19)$$

由曲线积分法可得到事故后系统的能量函数为

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M_{eq} \omega^2 - (P_m - P'_{e3})(\delta - \delta_s) -$$

$$P_{em3} [\cos(\delta - \gamma) - \cos(\delta_s - \gamma)] \quad (20)$$

临界能量为

$$V_{cr} = P_{em3} [2 \cos(\delta_s - \gamma) - (\pi - 2\delta_s + 2\gamma) \sin(\delta_s - \gamma)] \quad (21)$$

3 仿真结果及分析

3.1 算例分析

利用中国电力科学研究院的8机36节点模型进行仿真分析,其结线如图4所示。按照虚线所示进行断面划分,选择电压灵敏度最高的BUS21-BUS22(断面中最下面的一条线路)为观测线路,对两端系统进行有效动态等值,并构造等效能量函数。通过PSASP及Matlab编程进行仿真实验。

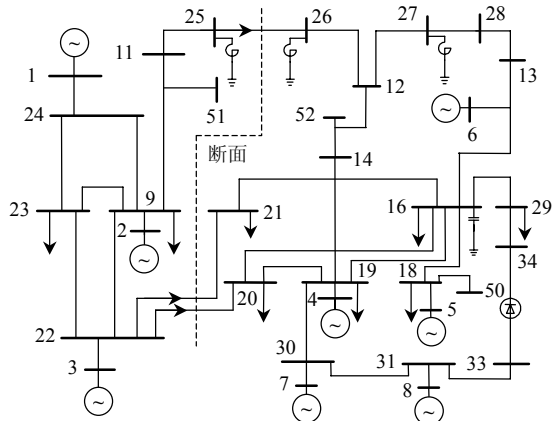


图4 8机36节点系统

Fig. 4 Eight generators thirty-six nodes system

分别设置如下故障:

- 1) BUS22-BUS23 靠近 BUS23 侧在 1~1.1 s 发生三相短路接地故障。
- 2) BUS22-BUS23 靠近 BUS23 侧在 1~1.3 s 发生三相短路接地故障。

3.2 仿真分析

针对 2 种故障均通过 3 种方式进行分析:

- 1) PSASP 仿真得到发电机组相对功角曲线,如图5—6所示;
- 2) 基于新的动态等值模型而得到暂态能量函数,如图7—8所示;
- 3) 基于新的动态等值模型得到的稳定域,如图9—10所示。

故障1下临界能量为2.5281 pu。从图5和7对比分析可以看出,相对功角波动大时暂态能量亦大,对应关系明确,从图9的稳定域可以看出各点收缩在稳定中心,系统具有较强的暂态稳定性。

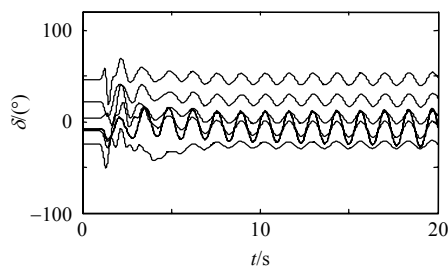


图5 0.1 s 三相短路时的相对功角曲线
Fig. 5 Relative power-angle curve when three-phase short-circuit time is 0.1 s

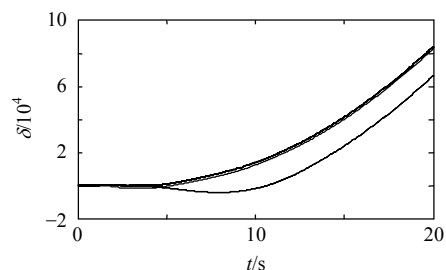


图6 0.3 s 三相短路的相对功角曲线
Fig. 6 Relative power-angle curve when three-phase short-circuit time is 0.3 s

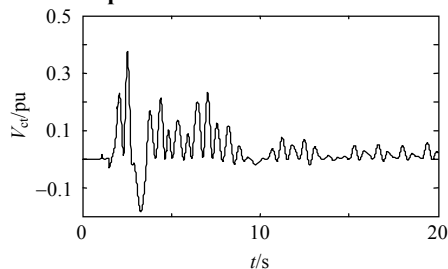


图7 0.1 s 三相短路时的暂态能量函数曲线
Fig. 7 Transient energy function curve when three-phase short-circuit time is 0.1 s

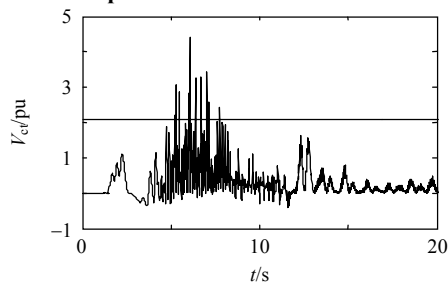


图8 0.3 s 三相短路时的暂态能量函数曲线
Fig. 8 Transient energy function curve when three-phase short-circuit time is 0.3 s

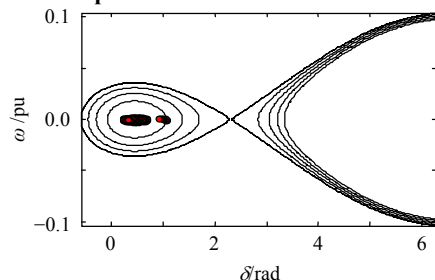


图9 0.1 s 三相短路时的稳定域
Fig. 9 Stable region when three-phase short-circuit time is 0.1 s

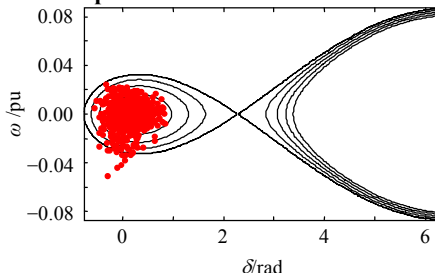


图10 0.3 s 三相短路时的稳定域
Fig. 10 Stable region when three-phase short-circuit time is 0.3 s

故障 2 下临界能量为 2.0879 pu, 为了能够更清楚地反映失稳时刻, 图 8 中将临界能量(直线)和暂态能量画在一起。从图 6 可以看出, 在 5 s 左右相对功角开始发散, 系统开始失稳, 而图 8 的能量函数中可以得到相同的结果, 对应关系清晰。从图 10 的稳定域图可以看出各点呈发散状, 并有部分点越过临界曲线, 系统暂态失稳。

4 结论

1) 基于所建立的动态等值模型构造等效单机无穷大系统暂态能量函数, 避免了 PEBS、BCU、EEAC 法工作量大的问题, 有效改善了模型精度不理想的现状, 分析计算不再受制于机组同调性约束。

2) 通过仿真实验比较相对功角曲线及能量函数曲线和稳定域图, 验证了本文提出的方法的有效性和可靠性, 能够较好地反映系统的暂态稳定性, 对实际的工程应用具有指导意义。

参考文献

- [1] 韩水, 苑舜, 张近珠. 国外典型电网事故分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 139-145.
- [2] 贾燕冰. 电力系统暂态稳定直接法的分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [3] 王英, 谭定中, 王小英, 等. 基于风险的暂态稳定性安全评估方法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 37-41.
Wang Ying, Tan Dingzhong, Wang Xiaoying, et al. Application of risk based transient stability and security assessment in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 37-41(in Chinese).
- [4] 李林川, 李彬, 王荣琴. 考虑联络线暂态稳定性约束的最优潮流计算[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 25-29.
Li Linchuan, Li Bin, Wang Rongqin. Calculation on optimal power flow considering transient stability constraints off tie-lines[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 25-29(in Chinese).
- [5] 束洪春, 董俊, 孙士云, 等. 直流调制对南方电网交直流混联输电系统暂态稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 29-33.
Shu Hongchun, Dong Jun, Sun Shiyun, et al. Study on advancing transient stability margin in AC/DC hybrid transmission system of southern china power grid by HVDC modulation[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 29-33(in Chinese).
- [6] 万秋兰, 单渊达. 对应用暂态能量函数法分析电力系统暂态稳定性的评价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 57-59.
Wan Qiulan, Shan Yuanda. Evaluation of the transient energy function methods for power system transient stability analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 57-59(in Chinese).
- [7] Maria G A, Tang C, Kim J. Hybrid transient stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 384-393.
- [8] 刘笙. 电力系统暂态稳定分析的能量函数法[J]. 电网技术, 1995, 19(2): 11-17.
Liu Sheng. Transient energy function analysis for power system stability[J]. Power System Technology, 1995, 19(2): 11-17(in Chinese).
- [9] 刘笙, 汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 15-25.
- [10] 闵勇, 陈磊. 包含感应电动机模型的电力系统暂态能量函数[J]. 中国科学, 2007, 37(9): 1117-1125.
- [11] Ishigame A, Taniguchi T. Transient stability analysis for power system using Lyapunov function with load characteristics[C]//IEEE Power Engineering Society 2003 General Meeting. New Jersey: IEEE Press, 2003: 13-17.
- [12] 张红斌, 李黎, 贺仁睦. 动静态负荷模型在电网暂态稳定计算中的应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 49-53.
Zhang Hongbin, Li Li, He Renmu. Application of dynamical and static load in transient stability calculations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 49-53(in Chinese).
- [13] 吴红斌, 丁明, 李生虎, 等. 发电机和负荷模型对暂态稳定性影响的概率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 19-21, 47.
Wu Hongbin, Ding Ming, Li Shenghu, et al. Probabilistic analysis on influence of generator model and load model on transient stability[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 19-21, 47(in Chinese).
- [14] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 135-140.
- [15] 付红军, 鞠平, 孙冉, 等. 广域电力系统负荷建模的对比研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 43-47.
Fu Hongjun, Ju Ping, Sun Ran, et al. Contrast studies on load modeling of wide area power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 43-47(in Chinese).
- [16] 艾芊, 陈陈, 沈善德, 等. 简化前馈网络用于负荷模型参数辨识的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 21-27.
Ai Qian, Chen Chen, Shen Shande, et al. Research on parameter identification of load models by using linear BP networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 21-27(in Chinese).
- [17] 张红斌, 汤涌, 李柏青. 差分方程负荷模型参数分散性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 1-5.
Zhang Hongbin, Tang Yong, Li Baiqing. Study on dispersing of difference equation load model parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 1-5(in Chinese).



汪小明

收稿日期: 2010-12-16。

作者简介:

汪小明(1986), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: wxm_crystal@yahoo.com.cn;

刘涤尘(1953), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力自动监控技术、电力系统运行与控制、电力电子技术应用、电力故障诊断及电磁兼容等。

(责任编辑 王晔)