

地区电网仿真建模及其在暂态分析中的应用

随着地区电网构成的复杂化,有必要对其开展暂态仿真分析和研究。阐述了地区电力系统仿真建模的基本理论和有效方法,并将该方法应用于本地区电网建模及暂态分析。由于建模过程充分考虑了地区负荷的构成及动态特性,其计算准确度及与实际系统的拟合程度得以提高,仿真分析结果对地区电网的生产运行及规划设计有较强的指导意义。

罗功银 王俊曦 周正 饶强/国网湖北省电力公司信息通信公司



罗功银/高级工程师

关键词/Keywords

地区电网·
建模·
综合负荷·
暂态分析·

从控制理论的角度来看,电力系统是由各种发电厂、各电压等级输、配网和电力负荷组成的集电能生产、输送、分配、变换和使用于一体的复杂的动态系统。随着系统规模的扩大,接入电网运行的发电及用电设备类型的多样化,其机电、电磁等暂态过程也更加复杂。电力系统受到各种扰动后,其暂态过程及其特性对系统的安全、稳定运行有着至关重要的影响。目前,对这一复制的暂态过程的研究主要依靠计算机仿真技术进行。由于超高压系统输电距离远,输送容量大,且系统的主力发电机组多接入超高压系统运行。因此,一般认为220 kV及以上的超高压系统稳定问题较为突出,对超高压系统动态过程的仿真研究也比较重视。而对220 kV以下的地区电网的仿真研究则较少关注,目前也主要局限于稳态潮流计算及简单故障模拟等方面,对其在各种扰动作用下的暂态过程及稳定性的分析则很少开展。实际上,与主网相比,地区电网虽电压较低,且供电范围有限,但组成各异,有的地区电网与主网联系较薄弱,有的除了从主网受电外,还有不少小水电、风

电等电源接入,负荷构成也比较复杂,含有不少冶金、机械加工、电力电子和整流等动态或非线性负荷。对于此类地区电网,其稳定问题并非高枕无忧,在一定扰动条件下,依然可能发生低频振荡、暂态失稳,引发电网解列、大面积停电等风险。因此,从地区电网的实际出发,对地区电力系统建立较为准确的仿真模型,并应用于地区电网稳、暂态分析研究有一定的必要性,本文将对此进行初步的探讨。

地区电力系统的仿真模型

计算机仿真结果对实际系统动态过程的拟合程度,取决于仿真计算所用数学模型相对实际系统结构、过程及参数描述的准确程度。电力系统主要由电源(各种类型发电机)、电力网(各电压级电力线路及变压器)、负荷(各种类型用电设备)及各种控制、调节设备组成。以此对应,电力系统的仿真模型也包括上述元件和设备。目前,在地区电力系统的仿真中,发电机组、电力线路和变压器等元件已经有了较为成熟、可靠的模型,它们的参数较易于获取,准确性一般也能满足仿真计算的要求。但对于系统的用电负荷,由于数量众多、分布广泛且特性各异,参数获取困难,尚缺乏统一、准确的模型及建模方法。在进行粗略估算时,负荷往往采用恒功率、恒阻抗和恒导纳等静态模型。这类模型完全忽略了负荷的动态特性,所得仿真结果准确度不高,特别是对负荷构成复杂,动态负荷比重较大的地区

电网, 仿真计算所描述的暂态过程相对实际过程偏差较大, 在临界条件下, 甚至会得出相反的结论, 以此来指导系统运行, 可信度不高。

1. 节点的综合负荷模型

如前所述, 为提高地区电网仿真计算的准确度, 关键是要提高负荷模型描述的准确度。但由于电网负荷数量庞大, 分布广泛, 特性各异, 要针对每一个用电负荷都单独建立模型, 并获取其准确参数, 并不现实。较为可行的一种方法是将地区电网各变电站的主要供电母线(即中枢节点)以下等效为一个综合负荷, 该综合负荷包含了节点所供的各类用电设备、无功补偿和接入节点的小水电等辅助电源, 以及向这些设备供电的配电网。模型结构如图1所示。

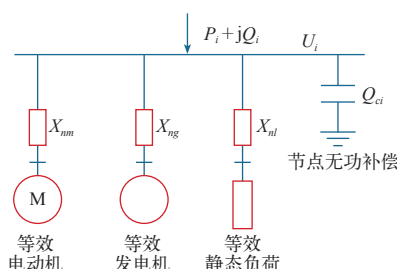


图1 广义综合负荷模型结构

该模型结构不仅包含了节点的各种静态及动态用电设备, 还考虑了接入节点的小电源、无功补偿等元件, 并计及了配电网阻抗及功率损耗的影响, 可称为节点的广义综合负荷模型。模型中各等效元件的数学模型如下。

(1) 广义等效电动机

采用感应电动机的三阶模型, 并考虑配电网阻抗、负荷时变特性及低电压释放特性的影响, 状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dE'_{xm}}{dt} = -\frac{1}{T'_0} [E'_{xm} + (X - X')I_{ym}] + \omega_B(\omega - \omega_r)E'_{ym} \\ \frac{dE'_{ym}}{dt} = -\frac{1}{T'_0} [E'_{ym} - (X - X')I_{xm}] - \omega_B(\omega - \omega_r)E'_{xm} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_{m0} - (E'_{xm}I_{xm} + E'_{ym}I_{ym})] \end{cases} \quad (1)$$

输出方程为

$$\begin{cases} I_{xm} = \frac{1}{R_s^2 + \omega^2(X' + X_{nm})^2} [R_s(U_x - \omega E'_{xm}) + X'(U_y - \omega E'_{ym})] \\ I_{ym} = \frac{1}{R_s^2 + \omega^2(X' + X_{nm})^2} [R_s(U_y - \omega E'_{ym}) - X'(U_x - \omega E'_{xm})] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_m = (U_x I_{xm} + U_y I_{ym})(1 - K_V) S_{Nm} \\ Q_m = (U_y I_{xm} - U_x I_{ym})(1 - K_V) S_{Nm} \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_V 为考虑电动机低电压释放特性而引入的低电压释放系数。

$$\text{等效电动机的额定容量 } S_{Nm} = \frac{(P_0 + P_{gen,0})K_P}{K_L},$$

K_P 和 K_L 是为消除负荷时变特性对建模的影响而引入的动静比例系数和初始负荷率系数, 两者分别定义为

$$K_P = \frac{P_{motor,0}}{P_{motor,0} + P_{static,0}} \times 100\% = \frac{P_{motor,0}}{P_0 + P_{gen,0}} \times 100\% \quad (4)$$

$$K_L = \frac{P_{motor,0}}{S_{Nm}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, $P_{motor,0}$ 为等效电动机初始有功功率; P_0 为节点初始有功功率; $P_{gen,0}$ 为等效发电机提供的初始有功功率。

(2) 广义等效发电机

采用凸机同步发电机三阶实用模型(E'_q 恒定)、转子 dq 坐标系, 并考虑配电网阻抗的影响, 状态方程为

$$\begin{cases} U_d = (X_q + X_{ng})I_{qg} - r_a I_{dg} \\ U_q = E'_q - (X'_d + X_{ng})I_{dg} - r_a I_{qg} \\ \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{2H} \{T_m - [E'_q I_{qg} - (X'_d - X_q)I_{dg} I_{qg}] - D(\omega_g - 1)\} \\ \frac{d\delta_g}{dt} = \omega_b(\omega_g - 1) \end{cases} \quad (6)$$

输出方程为

$$\begin{pmatrix} I_{dg} \\ I_{qg} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_a & X_q + X_{ng} \\ -(X'_d + X_{ng}) & -r_a \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} U_d \\ U_q - E'_q \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_g = U_d I_{dg} + U_q I_{qg} \\ Q_g = U_q I_{dg} - U_d I_{qg} \end{cases} \quad (8)$$

(3) 节点无功补偿

当节点上接有无功补偿设备时, 其无功出力

应考虑电压变动的影响, 计算公式为

$$Q_C = \frac{U^2}{U_N^2} Q_{CN} \quad (9)$$

(4) 等效静态负荷

采用恒导纳负荷 $Y_L = G_L + jB_L$ 描述, 并考虑配电网阻抗 X_{nl} 的影响, 计算公式为

$$\begin{cases} G_L = \frac{(P_0 + P_{\text{gen},0})(1 - K_P)}{U_0^2} \\ B_L = \frac{(Q_0 + Q_{\text{gen},0} + Q_{C0})(1 - K_P)}{U_0^2} \end{cases} \quad (10)$$

2. 综合负荷模型的参数获取及辨识

为实现节点负荷的仿真建模, 需获取或辨识上述综合负荷模型各等效元件的相关参数。在满足必要的仿真准确度的前提下, 为简化建模及参数辨识过程, 提高模型适应性, 减少参数分散性, 可采取统计综合法和整体辨识法相结合的建模方法, 其基本过程如图2所示。

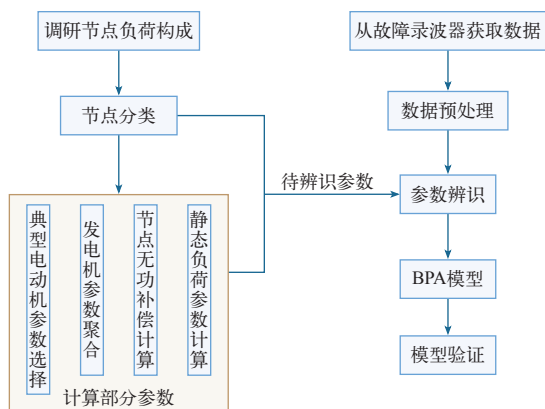


图2 负荷建模流程

按照上述流程, 计算或辨识得到所有节点综合负荷模型的全部参数, 并与系统其余元件, 如主力发电机、输电线路和变压器的模型参数一起录入相关仿真软件中, 便可得到整个地区电力系统的仿真模型。其中, 对接入高压系统的较大容量发电机应根据其机组类型、励磁系统及调速系统等特性参数单独建模, 对输电线路可采用其 π 形模型, 变压器可采用其T形模型。

仿真模型在地区电网暂态稳定分析中的应用

采用前述建模理论及方法, 建立了地区电网

完整的仿真模型后, 可用于对地区电网各种暂态过程的仿真计算和分析。以下为对本地区具有代表性的、富含小水电的镇宁片区电网暂态稳定分析实例。

该实例主要分析在丰水季节水电满发的情况下, 该片区电网与主网联络线有一回 (110 kV镇金线) 因检修停运, 另一回 (110 kV镇凤线) 发生瞬时性故障, 结合保护及重合闸动作情况, 片区电网能否稳定运行。仿真计算结果如图3和图4所示。

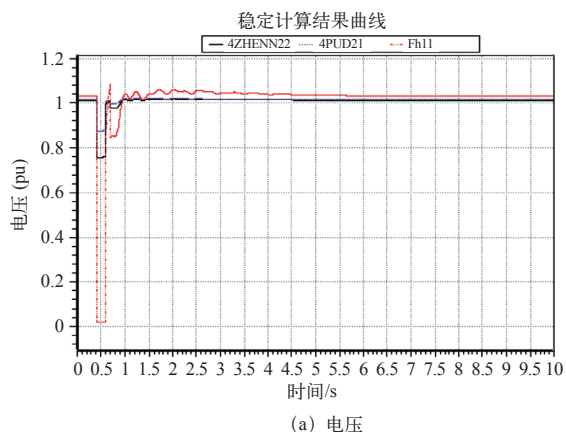
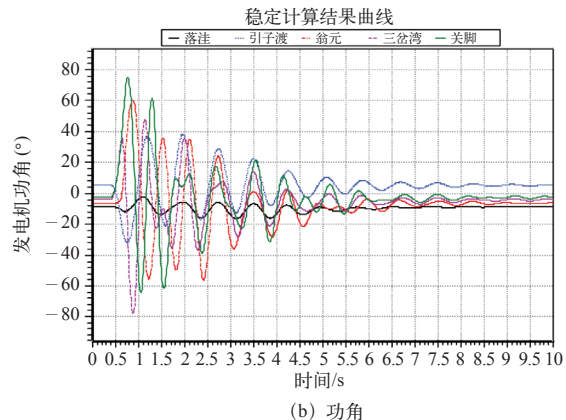
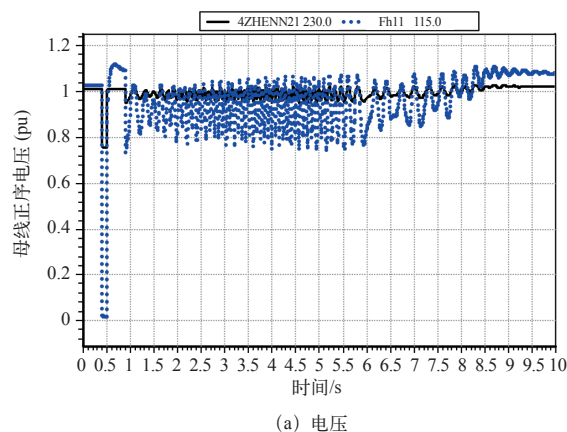


图3 镇凤线故障0.1 s跳闸, 0.8 s后重合的电压及功角曲线



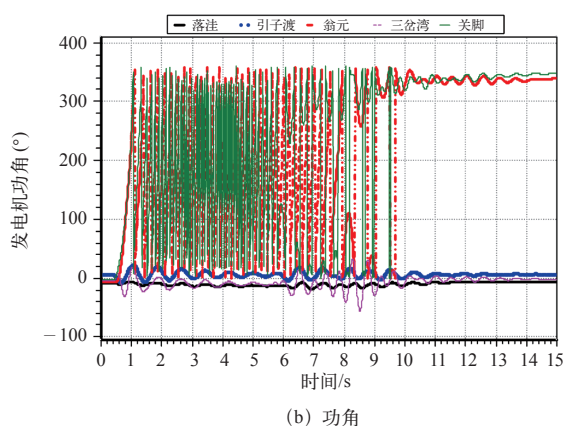


图5 镇凤线故障0.1 s跳闸, 0.9 s后重合的电压及功角曲线

由仿真计算结果可知, 在该运行方式下110 kV镇凤线发生故障, 如果保护能快速跳闸, 且重合闸动作时间在0.8 s以内, 该片区电网能迅速恢复稳定运行。如果保护或重合闸动作较慢, 则该片区水电机组的功角将出现剧烈振荡, 该片区电网不能稳定运行。为此提出以下建议:

1) 在丰水季节, 尽量避免安排该片区水电系

统与主网联络线的检修, 保持全接线方式运行。

2) 当其中一回联络线强迫停运时, 为保证片区电网的稳定运行, 应尽量缩短另一回联络线的保护及重合闸动作时间, 确保重合时间控制在0.8 s以内。

3) 若不能缩短重合闸动作时间, 可考虑退出剩余一回联络线的重合闸, 在线路故障后, 该片区可先孤网运行, 待暂态过程平稳后, 再并入主网运行。

结束语

本文阐述了地区电力系统仿真建模的理论和有效方法, 由于建模过程充分考虑了地区负荷的构成及动态特性, 其计算准确度及与实际系统的拟合程度得以提高, 仿真分析结果对地区电网的生产运行及规划设计有较强的指导意义。

(收稿日期: 2015-02-10) **EA**

(上接第107页)

- [7] 肖承俊. 减少变压器油色谱分析误差的方法 [J]. 江西电力, 2009, 33 (3): 44-46.
- [8] 徐康健. 变压器油色谱分析中试验误差分析 [J]. 电工技术, 2011, 11 (1): 27-28.
- [9] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction theory [J]. Trans. ASME. J. Bas. Eng., 1960, 82 (1): 35-45.
- [10] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用 [J]. 软件导刊, 2009, 8 (11): 32-34.
- [11] 张友民, 戴冠中, 张洪才. 卡尔曼滤波计算方法研究进展 [J]. 控制理论与应用, 1995, 12 (5): 529-538.
- [12] 付梦印, 邓中红, 张继伟. Kalman滤波理论及其在导航系统中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] Greg Welch, Gary Bishop. An introduction to the Kalman filter [R]. Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, 2006.

- [14] 李明干, 孙健利, 刘沛. 基于卡尔曼滤波的电力系统短期负荷预测 [J]. 继电器, 2004, 32 (4): 9-12.
- [15] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器 [J]. 自动化学报, 1991, 17 (6): 689-695.
- [16] 叶斌, 徐毓. 强跟踪滤波器与卡尔曼滤波器对目标跟踪的比较 [J]. 空军雷达学院学报, 2002, 16 (2): 17-22.
- [17] 徐景硕, 秦永元, 彭蓉. 自适应卡尔曼滤波器渐消因子选取方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26 (11): 1552-1554.
- [18] 周奕. 基于强跟踪滤波理论的电力系统动态状态估计算法研究 [D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [19] 高伟, 李敬春, 奔粤阳, 等. 基于多重渐消因子的自适应卡尔曼滤波器 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (7): 1405-1409.

(收稿日期: 2015-08-11) **EA**