

暂态低压减载对电力系统仿真结果的影响

郑晓雨¹, 郑静媛²

(1. 国家电力调度控制中心, 北京 100031; 2. 北京市电力公司丰台供电公司运维检修中心, 北京 100161)

The Effect of Transient Under-voltage Load Shedding Characteristic on Power System Simulation

ZHENG Xiaoyu¹, ZHENG Jingyuan²

(1. The Dispatching and Control Center of State Grid, Beijing 100031, China;
2. Beijing Fengtai Power Supply Company, Beijing 100161, China)

摘要: 电力系统暂态稳定性是评估电力系统稳定性的重要方面, 它的可信度很大程度上决定了电力系统规划、运行的有效性和合理性。目前, 电力系统暂态稳定仿真可信度提高的瓶颈在于负荷模型, 虽然近年来出现了许多新型实用的负荷模型, 但负荷的一些固有特性, 尤其是暂态低压减载特性并没有在暂态稳定仿真当中得以体现。为验证暂态低压减载特性对暂态稳定仿真的影响, 本文以 CEPRI-36 节点系统为例, 比较了不同负荷模型在发生暂态低压减载和未发生暂态低压减载情形下对暂态稳定仿真结果的影响, 结果表明负荷的暂态低压减载特性和负荷模型一样都对仿真结果有着很大的影响, 这种特性应该在暂态稳定仿真中加以考虑。

关键词: 暂态稳定; 负荷模型; 负荷减载; 暂态电压跌落

Abstract: Transient stability analysis is an important part of power system stability, which highly determines the effectiveness and rationality of power system such as system planning and operating. At present, the bottleneck of improving the reliability of transient stability analysis lies in the load model. Although lots of new practical load models have been presented recently, some characteristics, especially for load shedding under transient voltage sink, has not been considered in transient stability analysis. In order to verify the influence of load shedding characteristic under transient voltage sink in transient stability analysis, with the CEPRI-36 system as example, the influence of different load models under different situations in transient stability simulation are studied. The research shows that the load model and the load shedding characteristic under transient voltage sink both have great effect on simulation results, and this kind of characteristics should be considered in transient stability analysis.

Keywords: transient stability; load model; load shedding; transient voltage sink

0 引言

电力系统暂态稳定是考察电力系统稳定性的重要方面, 它通过在系统仿真中人为增设一些故障来检验系统抵御扰动的能力, 进而提出增强系统暂态稳定性的措施, 因此暂态仿真的可信度很大程度上决定了这些措施的有效性, 进而决定了系统的稳定性。如果一个暂态稳定仿真的结果比较保守, 那么随之而来, 为了确保电力系统的稳定运行, 将会采取一系列本该无需采取的措施, 比如基建方面增加线路或者设备, 运行方面压低机组出力或者降低线路的限额, 这都大大增加了电网的运营成本和控制的复杂度。相反, 如果一个暂态稳定仿真的结果比较冒进, 那么本应该采取的一些预防系统暂态失稳的措施将不会被实施, 此时系统的运行可能会处于一个危险的工况, 在此工况下万一发生特定的故障, 系统将会失稳, 甚至发生大面积停电。目前暂态稳定分析主要靠时域仿真, 只要仿真模型与实际系统相同, 那么, 暂态稳定仿真的结果是可以信赖的, 纵观仿真模型, 负荷模型由于负荷自身时变性、随机性、分散性等特点一直是仿真当中的难点^[1-5], 近些年随着人们对负荷模型重视程度的提高, 对它的研究也取得了很大的进展, 出现了许多实用的负荷模型。但在仿真当中, 仍然有许多对系统仿真有重大影响的负荷特性没有被引入到暂态稳定仿真当中, 其中暂态低压减负荷就是其中之一。与以往不同, 在现代社会的负荷构成当中电力电子、微电子等敏感元器件(比如计算机、数控设备)占了相当大的比重, 短时的暂态电压扰动都可

能会使这些设备退出运行^[6-8]，从而给电网造成二次冲击，而在目前的暂态稳定仿真当中几乎不考虑这种负荷特性，这就使得暂态稳定仿真的可信度大打折扣。为了阐明不同负荷模型及低压减负荷特性对暂态稳定分析的影响，本文以 CEPRI-36 节点系统为例，比较了采用静态模型和异步电动机模型两种情况下发生暂态低压减载和未发生暂态低压减载时系统的功角及电压的稳定性，结果表明，不同负荷模型对电力系统暂态稳定分析结果有不同的影响，暂态过程中低压减载的发生与否对功角和电压的影响非常大，在电力系统暂态稳定仿真中应当考虑这种负荷的固有特性，只有这样，暂态稳定仿真的可信度才会高，由此作出的决策才会正确。

1 负荷模型

在仿真中，各个元件的功能都是通过模型和参数来实现的，在电力系统模型当中，发电机、变压器、线路等设备的模型已经非常成熟，参数的获取途径也非常完善，唯有负荷模型，因为时变性、随机性等特点一直是研究中的难点。近些年来，随着人们对负荷模型重视程度的提高，负荷建模有了长足的进步。目前广泛应用的负荷模型有恒阻抗负荷模型、静态负荷模型、异步电动机负荷模型等，本文对比所采用的负荷模型为静态负荷模型和异步电动机负荷模型，其结构图如下：

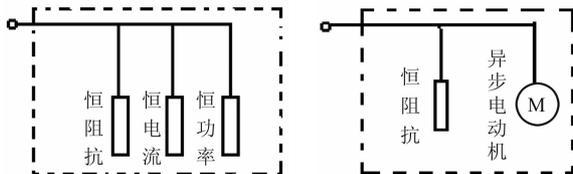


图 1 静态负荷模型

图 2 异步电动机负荷模型

2 暂态故障时低电压掉负荷特性

暂态稳定分析是分析系统受到大的扰动(比如三相短路、断线等)时的稳定性，这种扰动发生时，暂态过程通常非常短，比如 500kV 线路短路故障通常设置成近端 0.09s 切除，远端 0.1s 切除，但电压跌落往往非常大，尤其是靠近故障点的位置。而在暂态稳定仿真当中通常认为负荷在短暂的暂态故障过程中自身不会发生变化，不会因为短暂的低压情况而出现负荷脱扣，实际当中果然如此吗？下面是一条 2004 年某变电站进行大扰动实验时记录

的实测数据，图 3 为暂态电压，图 4 为暂态电压发生时记录到的有功功率，从图 3 可看出当暂态扰动消失后电压恢复到了初始水平，但从图 4 可看出，暂态扰动消失后负荷变小了，也就是说在短暂的电压扰动过后负荷出现了脱扣现象^[9-11]。

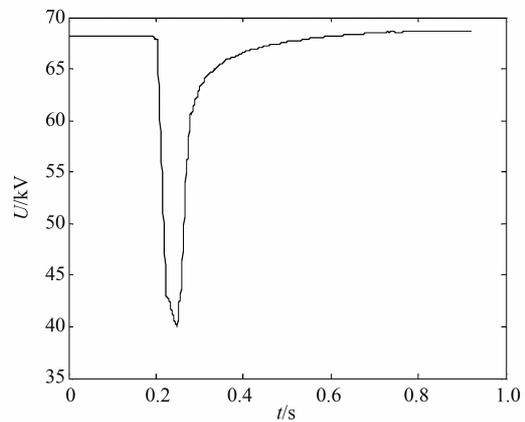


图 3 实测电压扰动

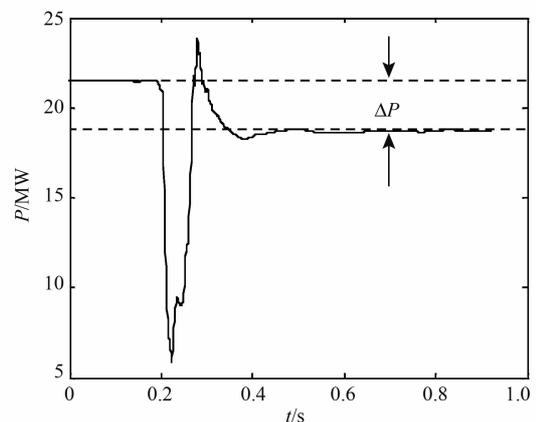


图 4 实测有功功率

3 暂态低压减载对暂态仿真的影响

在实际暂态稳定仿真当中往往会忽略实际电网中确实存在的低压减载现象，近似认为在暂态电压跌落的短暂过程中负荷不会发生脱扣现象，那么这种近似到底会对暂态稳定结果造成多大的影响呢？下面以 CEPRI-36 节点系统为例(如图 5)，来验证不同负荷模型及暂态低压减载现象对暂态稳定仿真结果的影响。为了比较暂态低压减载对不同特性系统的影响，本文将 CEPRI-36 节点系统分为送端系统(区域 1)和受端系统(区域 2)，区域 1 中 3 台机总出力 1 533MW，总负荷 959MW，区域 2 中 5 台机总出力 1 121MW，总负荷 1 536MW，区域 1 通

过 Line1、Line2、Line3 这 3 条联络线向区域 2 送电，功率 531.6MW。故障设置在 Line4 距 Bus19 2%处，1.0s 三相短路故障，1.12s 后故障消除，分别计算当负荷模型为静态模型和异步电动机模型

时区域 1、区域 2 负荷均无低压减载装置、仅区域 1 有低压减载装置、仅区域 2 有低压减载装置、两个区域均有低压减载装置 4 种条件下系统电压和功角的稳定情况。

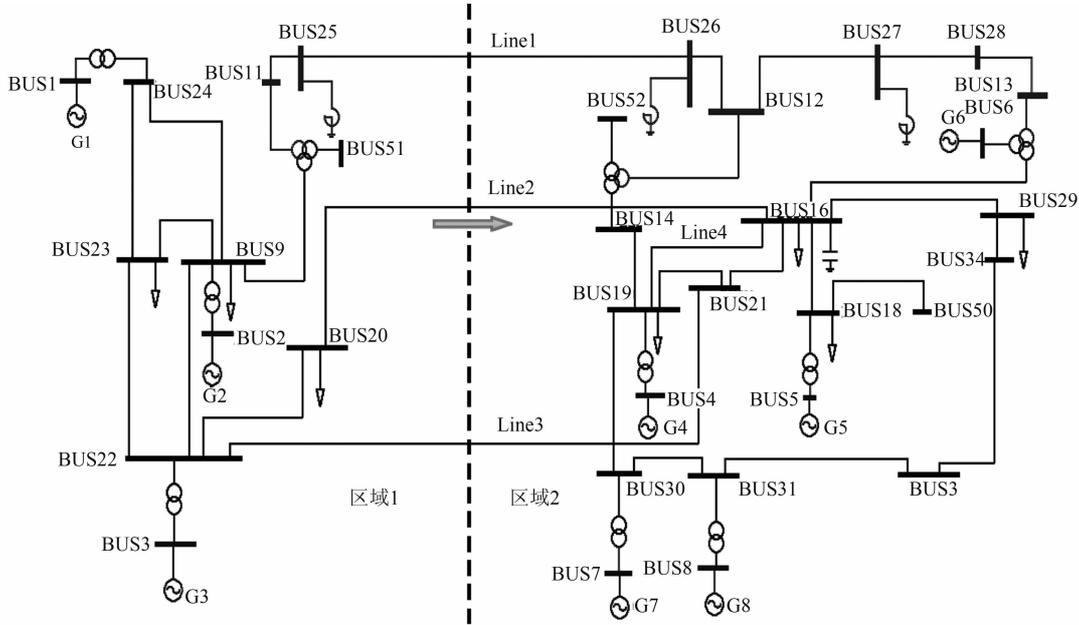


图 5 CEPRI-36 节点系统

3.1 不同负荷模型对计算结果的影响

当整个区域负荷采用静态负荷模型、部分异步电动机模型、全部异步电动机负荷模型，发生设定的故障时，Bus3 与 Bus5 之间的功角、Bus9 电压、Line2 的功率变化情况如图 6~图 8 所示。

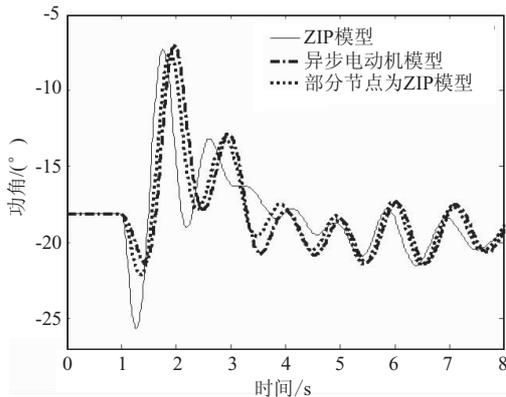


图 6 功角变化

从图 6~图 8 可以看出，不同负荷模型对暂态功角、电压都有很大的影响，从图 6 和图 8 可以看出，随着异步电动机含量的增加，功角和功率振荡收敛的速度变慢。从图 7 可以看出随着异步电动机含量的增加故障初期电压跌落的程度会增大，这在

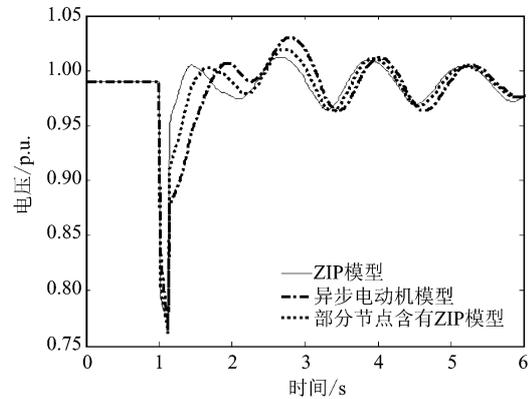


图 7 电压变化

理论上是合理的，因为在短路过程中，异步电动机由于惯性的作用，会起到异步发电机的作用，在发出有功的同时会吸收大量无功，进而会拉低附近的电压水平，因此不利于故障初期的电压稳定。而在故障后期的电压摇摆过程中，采用异步电动机模型时电压稍高，这与系统各元件(发电机、负荷等)的调节控制特性及系统运行方式有关，其表现随系统的不同而不同。也就是说，在功角稳定方面，采用静态模型会比采用异步电动机模型更保守，而在电压稳定方面，采用静态模型会比采用异步电动机模

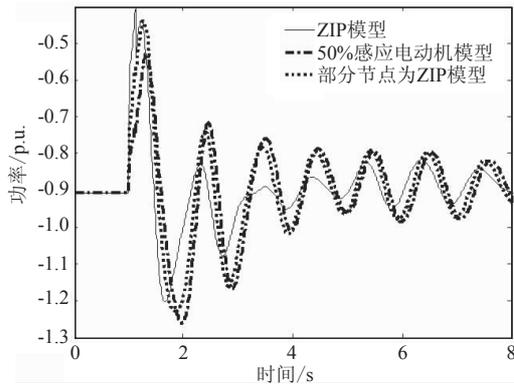


图 8 联络线功率变化

型更冒进。以往人们总是用一种所谓的保守的负荷模型来仿真，以期得到保守的仿真结果，这在以往负荷构成简单的情况下是实用的，但是随着负荷构成复杂度的提高，已经有一种负荷模型对所有情况都保守，所以建立符合实际的负荷模型势在必行。

3.2 不同低压减载情况对计算结果的影响

当整个区域采用静态负荷模型，发生设定的故障时，各种减载情况下 Bus3 与 Bus5 之间的功角、Bus9 电压、Line2 的功率变化情况如图 9~图 11 所示。

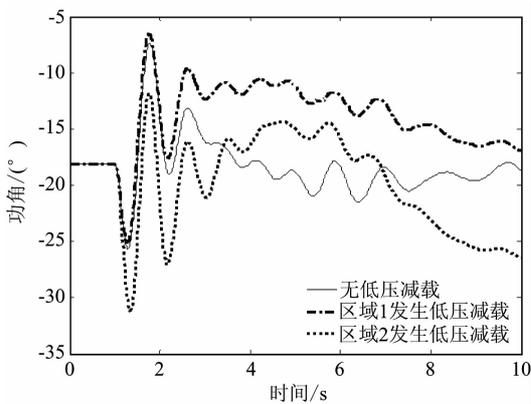


图 9 采用静态负荷模型时不同减载情况下功角变化

当整个区域采用异步电动机负荷模型，发生设定的故障时，各种情况下 Bus3 与 Bus5 之间的功角、Bus9 电压、Line2 的功率变化情况如图 12~图 14 所示。

从上面可以看出，暂态低压减载特性对暂态功角和电压有巨大的影响，从图 9 和图 12 可以看出，无论采用静态模型还是异步电动机模型，区域 1 发生低压减载后，送端功率需求相对减少，送出线路

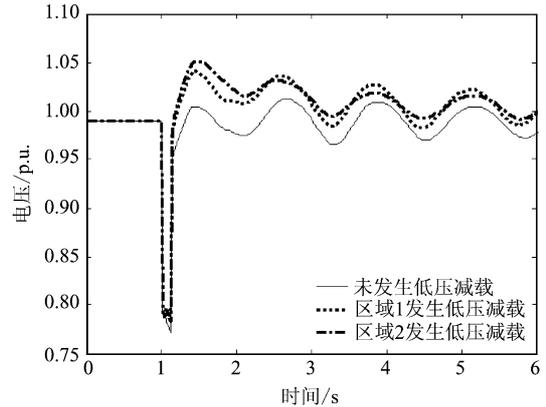


图 10 采用静态负荷模型时不同减载情况下电压变化

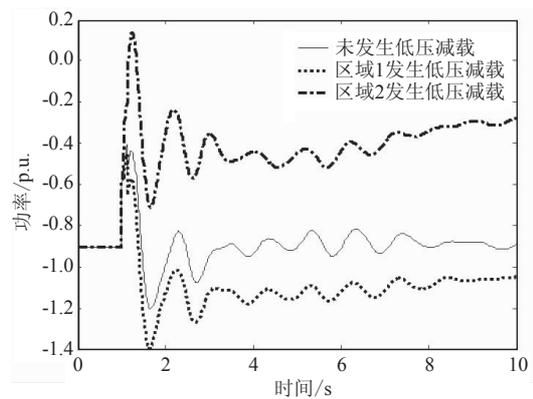


图 11 采用静态负荷模型时不同减载情况下联络线功率变化

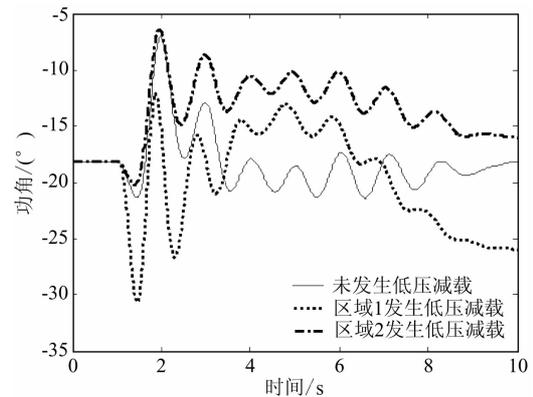


图 12 采用电动机负荷模型时不同减载情况下功角变化

功率变大，因此功角差会变大；区域 2 发生低压减载后，受端功率需求相对减少，联络线功率自然变小，因此功角差也会变小，这一点可从图 14 中看出来。从图 10 和图 13 可看出，无论采用何种负荷模型，区域 1 和区域 2 发生低压减载后电压都会比未发生低压减载后恢复的快，这是因为负荷被切除后无功需求和线路电压损失都变小，系统电压会被

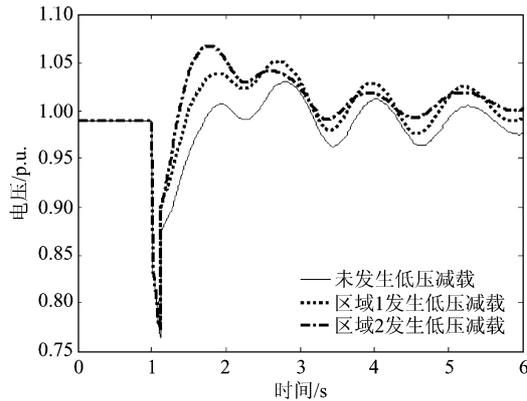


图 13 全网电动机负荷模型时不同减载情况下电压变化

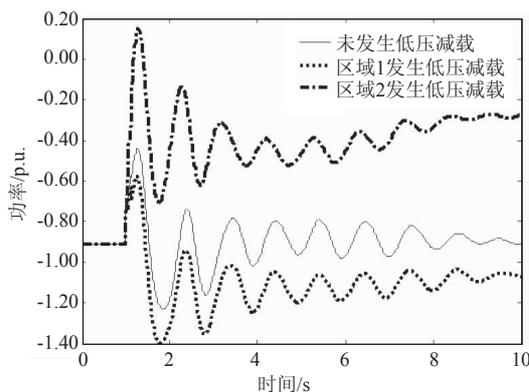


图 14 采用电动机模型时不同减载情况下联络线功率变化

明显抬升。因此,当暂态稳定仿真未考虑暂态低压减载特性时,对应功角和电压稳定来说,结果是保守的,但是在预防设备过电压方面,结果是冒进的,因为负荷减载造成的暂态电压陡升是普通负荷模型(无暂态低压减载特性)所无法描述的。

4 结束语

在以往的电力系统暂态稳定仿真当中,往往采用基于典型参数的静态模型或者异步电动机模型来模拟真实负荷,以期得到保守的负荷模型,这些模型在暂态仿真中往往不能体现实际系统中存在的暂态低压减载特性。本文以 CEPRI-36 节点系统为例,首先对比了不同负荷模型对暂态稳定仿真结果的影响,然后又比较了不同负荷模型条件下送、受端系统暂态低压减载对仿真结果的影响。结果表明不仅不同负荷模型对暂态仿真结果影响很大,就算同一负荷模型不同地区发生暂态低压减载也会对暂态仿真结果产生较大的改变,而且仿真结果还发现,同一负荷模型对功角稳定是保守的,但对于电

压稳定来说可能是冒进的,因此最安全、经济的做法是采用基于实测的负荷模型,只有这样才能得到科学合理的计算结果。

参考文献

- [1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 523-538.
- [2] Li Shao-Hua, Chiang Hsiao-Dong, Liu Sheng. Analysis of Composite Load Models on Load Margin of Voltage Stability [C]. PowerCon2006. International Conference on Power System Technology, pp1-7, October 22-26, 2006.
- [3] Praha Kundur. Power System Stability and Control [M]. McGraw Hill Companies, 1994: 271-278.
- [4] 贺仁睦,韩冬,杨琳. 负荷模型对电网安全性的影响研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(5): 1-5.
- [5] 鞠平,马大强. 电力负荷模型的机理式集结模型 [J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(3): 34-41.
- [6] 林舜江,李欣然,刘杨华等. 考虑负荷动态模型的暂态电压稳定快速判断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 14-20.
- [7] 蒋寿生,李欣然. 适合于电压稳定分析的综合负荷模型结构研究 [J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2001, 28(1): 24-30.
- [8] 李欣然,陈元新,唐忠. 一种适应大跨度电压变化的综合负荷静态模型 [J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 1999, 14(1): 38-41.
- [9] 郑晓雨,贺仁睦,马进. 适用于低电压暂态稳定分析的负荷模型 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 40-44.
- [10] 李欣然,陈元新,蒋铁铮. 电压稳定研究中的负荷模型及其建模方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(6): 9-13.
- [11] 戴剑锋,朱凌志,周双喜. 基于风险的低压减载策略问题研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 18-22.

收稿日期: 2013-09-27

作者简介:

郑晓雨(1984—),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统调度运行与分析, E-mail: zhengxiaoyu0908@163.com;

郑静媛(1984—),女,硕士,工程师,研究方向为电力系统动态仿真分析与控制, E-mail: yuan2653@163.com.

(责任编辑:林海文)