

配电网中感应电动机动态模型的比较分析

感应电动机是电力系统中最常见也是所占比例最大的一类负荷，建立合理、简化的感应电动机动态负荷模型，准确反映其动态行为对电网的冲击，在电力系统运行和规划中具有重要意义。以经典的感应电动机五阶电磁暂态模型为基础，忽略定子绕组的暂态过程，可以得到三阶机电暂态模型；在三阶机电暂态模型的基础上忽略转子的暂态过程，可以得到一阶机械暂态模型；当不考虑运动方程的暂态时，可以得到另一种一阶模型，即一阶电压暂态模型。在Matlab/Simulink中搭建这四种感应电动机模型，对不同电压扰动下的动态响应进行仿真，并对其响应曲线进行比较分析，得出相关结论。

徐海利/福建电力职业技术学院 李吉昌/积成电子股份有限公司

0 引言

随着我国电网规模的扩大，对供电可靠性和供电质量的要求越来越高，电网的设计规划、调度运行越来越依赖数字仿真。准确的模型是数字仿真的基础，模型的准确性直接影响仿真的结果。对于发电机、变压器、输电线路和励磁系统等元件，已有各种适应不同仿真准确度的数学模型；然而对于电力系统中最重要的负荷，由于其时变性、分布性、复杂性、多样性和不连续性等各种特性，导致其建模的工作异常困难^[1]。大量研究和实践表明，负荷模型对电力系统的潮流计算、短路计算、安全分析和电压稳定性分析都有显著的影响，甚至不同的负荷模型会导致仿真的结果发生质的变化^[2-4]。因此，准确的负荷模型对提高系统输电能力以及消除安全隐患具有重大意义^[5-7]。

电力综合负荷是电力系统的重要组成部分，其中感应电动机是最主要的

动态成分。因此，在电力系统仿真计算中，感应电动机模型是最常用的动态负荷模型。感应电动机对电压扰动异常敏感，建立感应电动机合理的等效模型，可以有效地分析其对电网的冲击，减小其对电网的不利影响，使电网能够安全可靠的运行^[8]。从而避免大的停电事故，大大减小了停电带来的经济损失，对系统的稳定运行有重大的意义。

本文推导了感应电动机的五阶电磁暂态模型、三阶机电暂态模型、一阶机械暂态模型和一阶电压暂态模型，并在Matlab/Simulink中搭建这四种感应电动机模型，同时对不同电压扰动下的动态响应进行仿真，并对响应曲线进行比较分析，得出相关结论。

1 感应电动机动态模型

因为感应电动机在动态负荷中占有很大的比重，所以很多情况下用感应电动机的动态模型作为负荷动态模型的基础，再配之以相应的恒定阻抗负荷或按静态特性模拟的负荷。在使用时，对于不同分析准确度和速度的要求，感应电动机所用数学模型的准确程度也不相同。

对于感应电动机，在理想条件下，可以列出abc坐标系下的基本方程，然后通过Park变换将其变换到以同步转速旋转的dq0坐标系。按照电动机惯例，规定感应电动机各个变量的参考正方向，然后列出电动机的五阶电磁暂态模型，这是感应电动机比较准确和完整的模型；忽略定子暂态过程，可以得到三阶机电



徐海利/讲师

关键词/Keywords

感应电动机 ·
动态负荷建模 ·
动态特性 ·

暂态模型，这是电力系统仿真中最常用的模型；进一步忽略转子暂态过程，得到机械暂态模型，在研究以有功功率为主的暂态过程时常用此模型；当忽略转子角速度和转子位置角的动态过程时，得到电压暂态模型，在研究以无功功率为主的动态过程时常用此模型。

1.1 电磁暂态模型

感应电动机的状态方程主要由电压方程、磁链方程和运动方程组成。根据上述规则， $dq0$ 坐标系下的感应电动机五阶方程如下（以下均为标幺值）。

(1) 电压方程

$$\begin{cases} U_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \\ U_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \\ 0 = U_{dr} = R_r I_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} \\ 0 = U_{qr} = R_r I_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中， U 为电压； I 为电流； Ψ 为磁链； R 为电阻； ω 为角速度；下角标 s 为定子侧的量；下角标 r 为转子侧的量；下标 d 为Park变换后 $dq0$ 坐标系下的 d 轴分量；下标 q 为Park变换后 $dq0$ 坐标系下的 q 轴分量。

(2) 磁链方程

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_{so} I_{ds} + L_{sr} (I_{ds} + I_{dr}) \\ \Psi_{qs} = L_{so} I_{qs} + L_{sr} (I_{qs} + I_{qr}) \\ \Psi_{dr} = L_{ro} I_{dr} + L_{sr} (I_{ds} + I_{dr}) \\ \Psi_{qr} = L_{ro} I_{qr} + L_{sr} (I_{qs} + I_{qr}) \end{cases} \quad (2)$$

式中， L_{sr} 为定、转子互感系数； L_{ro} 为转子漏感系数； L_{so} 为定子漏感系数。

(3) 转子运动方程

$$T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_E - T_M \quad (3)$$

式中， T_J 为惯性时间常数； T_E 为电磁转矩； T_M 为机械转矩。

电磁转矩的表达式为

$$T_E = \Psi_{qr} I_{dr} - \Psi_{dr} I_{qr} \quad (4)$$

机械转矩根据不同的负载有不同的表达式

$$T_M = T_0 [\alpha + (1 - \alpha) \omega_r^P]$$

$$\begin{aligned} T_M &= T_0 \omega_r^P \\ T_M &= T_0 [A \omega_r^2 + B \omega_r + C] \\ T_M &= T_{M0} + \beta_0 \Delta \omega_r \\ \Delta \omega_r &= \omega_r - \omega_{r0} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， α 为与转速无关的阻力矩系数； P 为与转速有关的阻力矩的幂指数； T_{M0} 为稳态机械转矩； A 、 B 、 C 、 β_0 为转矩系数。

1.2 机电暂态模型

感应电动机定子暂态过程比转子暂态过程要快很多，相比于电力系统的电磁暂态过程也要快很多，所以在研究感应电动机负荷对电力系统的影响时，定子绕组的暂态过程常常可以忽略不计。忽略定子绕组的暂态过程，即认为

$$p \Psi_{ds} = p \Psi_{qs} = 0 \quad (6)$$

式中， p 为微分符号， $p = d/dt$ ，因此，感应电动机状态方程的阶数降至三阶。

在对电动机进行暂态分析时，为了便于运用磁链守恒定律，引入了暂态电动势。为了使方程的形式更加简洁，有时采用极坐标形式。

1.3 机械暂态模型

在忽略了定子暂态过程的机电暂态模型的基础上，进一步忽略转子绕组的暂态过程，也就是忽略所有的电磁暂态过程，只考虑机械暂态过程，因此就得到了机械暂态模型。

忽略转子暂态过程，即 $p \Psi_{dr} = p \Psi_{qr} = 0$ 根据直轴和交轴暂态电动势的定义式可知， $p E'_d = p E'_q = 0$ ，即 $p E' = 0$ 。将其代入到相量形式的三阶模型方程式中，得到

$$0 = -E' + j(X - X') I' + j(\omega_r - f) E' T'_{d0} \quad (7)$$

通过整理可得

$$E' = \frac{j(X - X')}{1 - jT'_{d0}(\omega_r - f)} I \quad (8)$$

将其代入电压方程的相量方程式中，可得

$$U = Z_\Sigma I \quad (9)$$

其中

$$Z_\Sigma = R_s + jX' + \frac{j(X - X')}{1 - jT'_{d0}(\omega_r - f)} = R_\Sigma + jX_\Sigma \quad (10)$$

设感应电动机的定子阻抗 $Z_s = R_s + jX_{so}$ ，转

子阻抗 $Z_r = R_r/s + jX_{r\sigma}$ ，励磁阻抗 $Z_m = jX_{sr}$ 。则可以证明

$$Z_\Sigma = Z_s + \frac{Z_r Z_m}{Z_r + Z_m} \quad (11)$$

Z_Σ 的物理意义可由感应电动机的T形等效电路得到，如图1所示。可见， Z_Σ 为转子阻抗与励磁电抗并联后，再与定子阻抗串联。

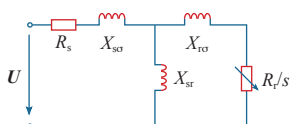


图1 感应电动机的T形等效电路

根据电路图可以求得

$$P = \frac{U^2}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} R_\Sigma = U^2 G_\Sigma \quad (12)$$

机械暂态模型是一个一阶的状态方程，仅由一个转子运动方程组成。因此可以推出一阶模型电磁转矩的表达式为

$$T_E = [U^2 G_\Sigma - I^2 R_s] / f = \frac{U^2 (R_\Sigma - R_s)}{(R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2) f} \quad (13)$$

根据不同的负载性质，机械转矩有不同的表达式，代入之后可以得到不同的状态方程。

1.4 电压暂态模型

在三阶机电暂态模型中，忽略动态过程，也就是在极坐标形式下的三阶模型方程式中，前两个方程左边的导数忽略不计，得

$$T_E = T_M = -E'U \sin \delta / X' = P_d \quad (14)$$

即

$$U \sin \delta = -T_M X' / E' \quad (15)$$

代入到三阶模型方程式中的第三个方程，得到

$$T' \frac{dE'}{dt} = -E' + C \sqrt{U^2 - (T_M X' / E')^2} \quad (16)$$

这个模型只考虑了电动势的动态过程，故叫作电压暂态模型。由于根号下的表达式不能出现为负数的情况，所以对该模型有以下的限制

$$U < |T_M X' / E'| \quad (17)$$

2 感应电动机动态模型的比较

本文首先用两个标准的电压扰动波形对感

应电动机的四个动态模型进行仿真，对比不同模型之间有功功率和无功率的动态响应差异。第一个波形选取电压突然跌落之后再突然恢复的波形，第二个波形选取电压持续线性跌落的波形。然后用四种模型分别进行一次机端短路的仿真，观察不同模型短路后的动态行为，再进行比较分析。

图2是仿真测试示意图，感应电动机模型直接和三相交流电压源相连，并产生所需要的测试波形。从理论上讲，当感应电动机所在位置发生电压骤降时，如果考虑感应电动机的动态特性，电压骤降的波形会发生畸变，在故障清除前，感应电动机的转矩和转速下降；在故障切除后，感应电动机加速恢复到稳定状态，自起动电流将很大，从而阻碍电压恢复速度，感应电动机的母线电流、转速和电磁转矩等特性也将发生变化。因此，感应电动机的动态特性与电压跌落有着密切的关系。通过测量定子电压和定子电流，计算出感应电动机吸收的有功功率和无功率，从而得到不同的电压测试波形下感应电动机有功功率和无功率的动态响应。

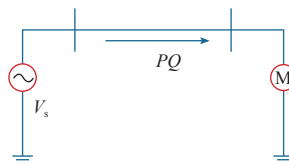


图2 仿真测试接线图

2.1 电压突然跌落后再突然恢复

所加电压有效值（标幺值）的波动如图3所示。在1 s之前，所加电压为额定电压；1 s时，电压跌落至额定值0.9倍；在1.15 s时，电压恢复正常。分别用四种电动机模型代替图中的M，测量电动机吸收的有功功率和无功率，并绘制出 $P-t$ 曲线和 $Q-t$ 曲线如图4、图5所示。

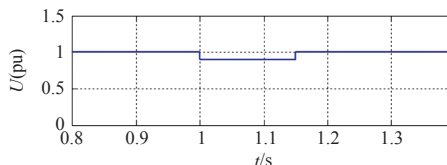


图3 测试电压有效值

通过有功功率和无功率动态响应的分析，

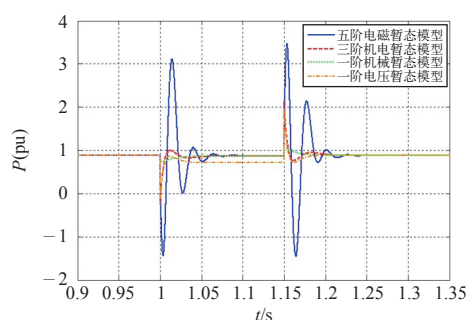


图4 四种模型的有功功率动态响应

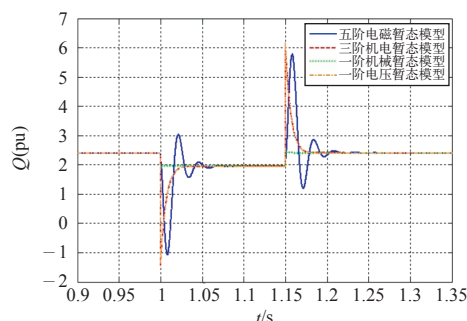


图5 四种模型无功功率动态响应

可以得到如下结论:

1) 三阶机电暂态模型可以定性描述出扰动下的电磁暂态过程,若要定量描述有功功率的波动,则有很大的误差。描述无功功率的动态响应,三阶机电暂态模型可以代替五阶模型,误差不会很大。

2) 一阶机械暂态模型不能描述有功功率暂态过程,但是其稳态部分的响应还是接近于五阶模型和三阶模型,且一阶机械暂态模型完全不能描述无功功率的暂态过程。

3) 一阶电压暂态模型描述有功功率的动态响应时误差较大,但是其描述无功功率的动态响应时,和三阶机电暂态模型几乎一致,可以代替三阶机电暂态模型。

2.2 电压持续跌落

假定电压的有效值呈线性持续跌落,从1 s开始发生跌落,到2 s时电压已经跌落为0。图6为测试电压的有效值波形。测量得到的有功功率动态响应 $P-t$ 曲线和无功功率动态响应 $Q-t$ 曲线分别如图7、图8所示。

同电压突然跌落的仿真结果类似,在有功功率动态响应方面:五阶电磁暂态模型最为准确,

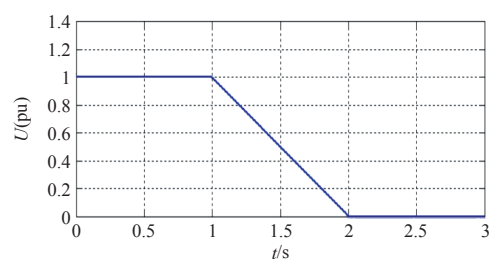


图6 测试电压有效值波形

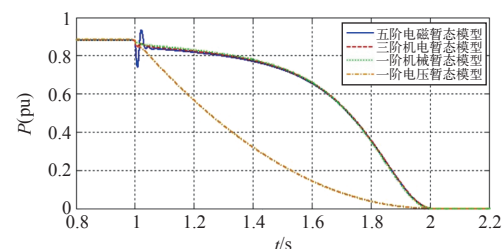


图7 有功功率动态响应

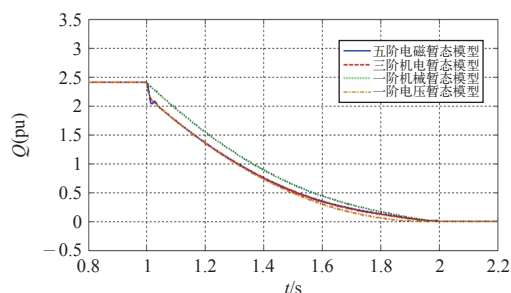


图8 无功功率动态响应

能反映出暂态过程;三阶机电暂态模型和一阶机械暂态模型的响应趋势大致和五阶模型一致;而一阶电压暂态模型则有比较大的误差。在无功功率动态响应方面:五阶电磁暂态模型和三阶机电暂态模型的无功功率响应基本一致;一阶电压暂态模型有较小的误差;一阶机械暂态模型误差较大。

根据仿真结果,绘制出有功随电压变化的 $P-U$ 特性曲线和无功随电压变化的 $Q-U$ 特性曲线,分别如图9、图10所示。在图9的仿真中,使用一阶电压暂态模型和其他三个模型的差别比较大;在图10的仿真中,五阶电磁暂态模型和一阶电压

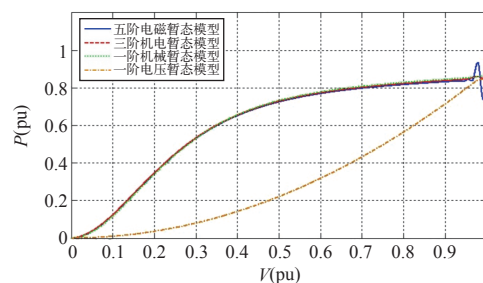


图9 有功-电压特性曲线

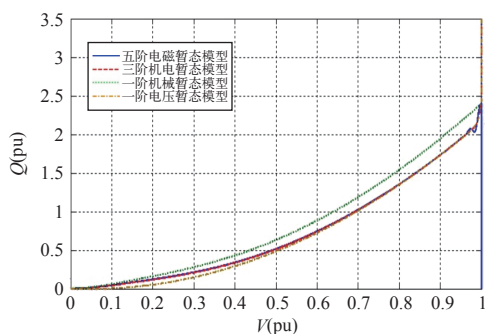


图10 无功-电压特性曲线

暂态模型的曲线几乎重合，一阶机械暂态模型则和其他三个模型差别比较大。

值得注意的是，五阶电磁暂态模型和一阶电压暂态模型的 $Q-U$ 曲线中，在电压下降到0.983 V附近时，随着电压继续下降，感应电动机吸收的无功功率反而增多，这个点的存在对电压稳定性有不利的影响。

2.3 三相短路故障的仿真

假定感应电动机通过一条输电线路与无穷大系统相连，在1 s时发生三相短路故障，1.2 s时故障被切除，仿真示意图如图11所示。通过仿真可以得到故障电压有效值波形如图12所示。

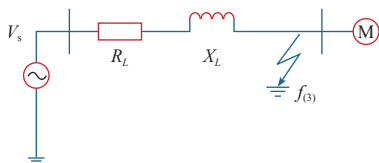


图11 短路仿真示意图

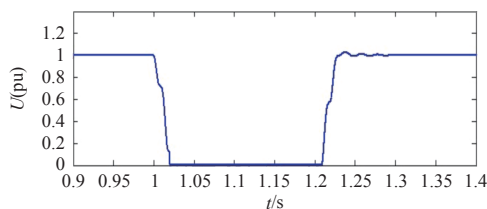


图12 故障电压有效值

三相短路故障时有功功率和无功功率的动态响应如图13、图14所示。

分析各个模型有功功率的动态响应，在短路瞬间电压跌落时，各个模型的动态特性基本一致；在故障切除时，电压开始逐渐恢复到正常值，此时五阶电磁暂态模型表现出了幅值很大的

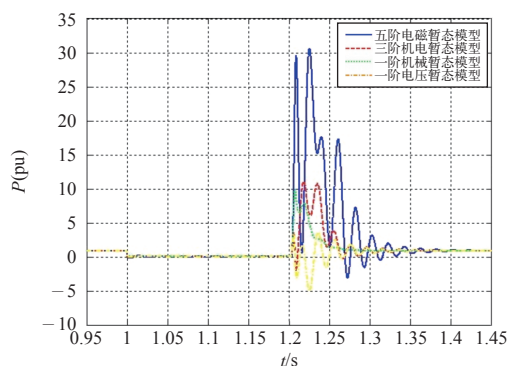


图13 三相短路故障时有功功率动态响应

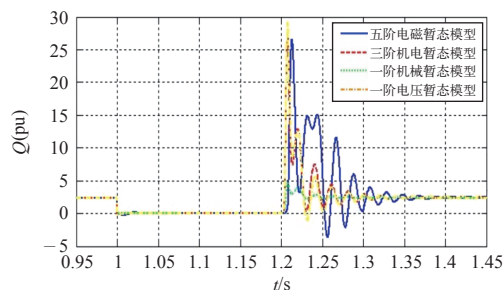


图14 三相短路故障时无功功率动态响应

有功功率波动，三阶机电暂态模型和一阶机械暂态模型也表现出了一定幅值的有功功率波动，而一阶电压暂态模型在开始时出现了负值的有功功率，波形与其他三个模型不太一致。

分析各个模型的无功功率动态响应，在短路发生瞬间电压跌落时，四个模型的无功功率动态响应几乎一致。在故障切除时，电压恢复的暂态过程中，五阶电磁暂态模型、三阶机电暂态模型和一阶电压暂态模型都表现出了较大幅值的无功功率冲击，而且他们冲击的幅值几乎相似；在第二个冲击中，五阶模型的幅值仍然比较高，而三阶机电暂态模型和一阶电压暂态模型的无功功率冲击则已经衰减。总体来说，五阶电磁暂态模型、三阶机电暂态模型和一阶电压暂态模型的动态行为表现基本一致，而一阶机械暂态模型在短路故障切除后电压恢复时，没能表现出无功功率的冲击，与其他三个模型的动态行为不相符合。

故障电流瞬时值和有效值的波形如图15、图16所示。分析四种模型的短路电流，在故障发生和故障切除瞬间都表现出了短路电流的冲击。三阶机电暂态模型和一阶电压暂态模型表现出的冲击电流相差不远，都低于五阶电磁暂态模型；而

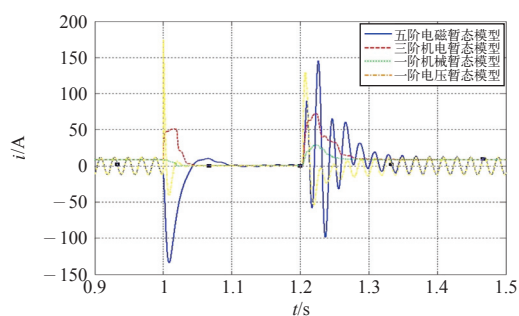


图15 故障电流瞬时值

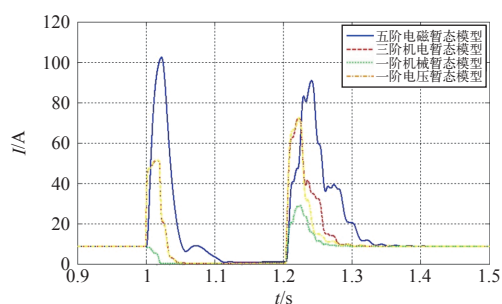


图16 故障电流有效值

一阶机械暂态模型在短路瞬间没有表现出短路电流的冲击,与事实不相符合,其短路电流水平比其他三个模型较低。结合前面无功功率动态响应的分析,一阶机械暂态模型不能准确描述实际的无功功率响应,而短路瞬间的电流主要是感性的无功电流,由此不难理解一阶机械暂态模型的短路电流水平低于其他三种模型。

3 结束语

利用Matlab/Simulink软件搭建了四种感应电动机的动态模型,在相同的条件下,分别对四种模型进行仿真,并观察其动态特性是否一致。本文给出了两种电压扰动波形和一种三相机端短路的情况,分别仿真了四种模型的有功功率和无功功率的动态响应,将四种模型的曲线放在一个坐标图中进行比较,最后得出如下结论:

1) 五阶电磁暂态模型和三阶机电暂态模型的动态行为趋势基本一致,但是五阶电磁暂态模型的暂态波动过程更加明显,有更大的波动幅值。当暂态过程结束以后,两个模型的动态响应曲线几乎重合。

2) 相比于三阶机电暂态模型,一阶机械暂态模型的有功功率动态响应比较准确,而无功功率

的动态响应有比较大的误差。

3) 相比于三阶机电暂态模型,一阶电压暂态模型的无功功率动态响应比较准确,而有功功率的动态响应有比较大的误差。

4) 在短路电流计算方面,由于短路电流主要是感性无功电流,所以相比于三阶机电暂态模型,一阶电压暂态模型的短路电流波形比较准确,一阶机械暂态模型则不准确。

参考文献

- [1] Morison K, Hamadani H, Wang Lei. Practical issues in load modeling for voltage stability studies [C]. Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003: 1392-1397.
- [2] Aboul-Seoud T, Jatskevich J. Dynamic modeling of induction motor loads for transient voltage stability studies [C]. Electric Power Conference, 2008, EPEC, 2008, Canada IEEE, 2008: 1-5.
- [3] Price W W, Wirgau K A, Murdoch A, et al. Load modeling for power flow and transient stability computer studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3 (1): 180-187.
- [4] Morison K, Hamadani H, Wang L. Load modeling for voltage stability studies [C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006, PSCE'06, IEEE PES, 2006: 564-568.
- [5] 张红斌, 汤涌, 张东霞, 等. 不同负荷模型对东北电网送电能力的影响分析 [J]. 电网技术, 2007, 31 (4): 55-58.
- [6] 张鹏飞, 罗承廉, 孟远景, 等. 河南电网送端和受端负荷模型对稳定极限的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31 (6): 51-55.
- [7] 李鹏, 余贻鑫, 贾宏杰. 关于更准确的电压稳定极限描述中所需模型与方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 21-26.
- [8] Omata T, Uemura K. Aspects of voltage responses of induction motor loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (4): 1337-1344.

(收稿日期: 2015-08-19) EA