

# 感应电动机模型和机械转矩参数对暂态电压稳定评估的影响

李佳<sup>1,2</sup>, 刘天琪<sup>1</sup>, 李兴源<sup>1</sup>, 邢大鹏<sup>2</sup>, 何笠<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072;  
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 基于三阶感应电动机模型, 同时考虑机械转矩参数, 给出了快速评估法下极限切除时间的计算方法, 分析了转子绕组电磁暂态特性和机械转矩参数对极限切除时间的影响。该方法提高了感应电动机模型精度, 同时计算更加简便, 可用于动态安全评估系统的计算。IEEE30 系统仿真结果表明较高的机械转矩次数有利于负荷节点暂态电压稳定, 而转子绕组的电磁暂态特性不利于负荷节点的暂态电压稳定, 模型精度对极限切除时间的影响小于机械转矩参数的影响。

**关键词:** 感应电动机模型; 机械转矩参数; 暂态电压稳定; 极限切除时间

## Influence on assessment of transient voltage stability by induction motor model and mechanical torque parameters

LI Jia<sup>1,2</sup>, LIU Tian-qi<sup>1</sup>, LI Xing-yuan<sup>1</sup>, XING Da-peng<sup>2</sup>, HE Li<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Sichuan Technical Training Center, Chengdu 610072, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Based on three-order induction motor load model and considering different mechanical torque, a method for calculating critical clearing time under rapid assessment is presented. The effect on critical clearing time by rotor winding electromagnetic transient characteristics and mechanical torque parameters is analyzed. The proposed method improves the accuracy of induction motor load model, and the time index can be calculated more simply so that this method can be used in dynamic security assessment system as a computational engine. The simulation result of IEEE30 bus system shows that the power of mechanical torque benefits the transient voltage stability of load nodes, and the electromagnetic transients in rotor winding harm the transient voltage stability; the effect of model accuracy on critical clearing time is smaller than that of mechanical torque parameters.

**Key words:** induction motor model; mechanical torque; transient voltage stability; critical clearing time

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0019-06

## 0 引言

暂态电压失稳主要是由系统中快速响应元件的动特性引起的<sup>[1-4]</sup>, 例如发电机励磁系统、感应电动机和 OLTC。感应电动机是动态负荷的主要成分, 在工业负荷中所占的比例高达 90%以上, 被认为是暂态电压失稳的关键诱因<sup>[5-9]</sup>。文献[10]研究发现感应电动机堵转是辐射型电力系统发生电压崩溃的主要原因。文献[11]指出系统中若有一台感应电动机负荷失稳, 则可认定系统电压失稳; 当所有感应电动机负荷全部稳定, 才能判定系统为电压稳定。

文献[12]在单负荷无穷大系统中研究了暂态电压稳定问题, 发现如果故障切除太慢, 感应电动机的转差可能单调上升至堵转, 据此提出了故障临

界切除时间的概念。文献[13]认为故障极限切除时间在一定程度上反映了系统暂态电压稳定性的强弱。文献[14]通过时域仿真证明感应电动机负荷决定了暂态极限切除时间。文献[15]认为暂态电压稳定与元件的动态响应时间和元件模型有关, 数学模型越精确, 则获得的指标可信度越高。文献[14]分析、比较了感应电动机负荷参数变化对暂态电压稳定性的影响时, 发现感应电动机转子电阻、转子电抗、转子转差等参数对电力系统暂态电压稳定性的影响较大。

目前, 基于极限切除时间评估负荷节点暂态电压稳定性的方式主要有两种: 一种是时域仿真法, 通过不断尝试得到相应的暂态电压稳定极限切除时间<sup>[14]</sup>, 这种方法计算量大、耗时长<sup>[16]</sup>; 另一种方式

是快速评估法<sup>[11,16-18]</sup>，以故障切除后临界转差所对应的时间为极限切除时间。如果故障期间的转差超过临界转差，则故障切除后电动机转速不能恢复，失去稳定<sup>[17]</sup>。由于故障后的不稳定平衡点能够反映负荷节点的暂态电压稳定状态<sup>[18]</sup>，因此该方法在实际系统和标准系统中得到了验证和应用。针对快速评估法，文献[16]指出一阶模型未计及转子绕组的电磁暂态特性，需要后续补偿算法弥补不足，但补偿方法较为复杂，且未考虑机械转矩参数。文献[17]在文献[16]基础上计及了感应电动机的机械转矩，提出了一种快速解析法来评估暂态电压稳定性，但仍然采用了简化感应电动机模型。

本文基于感应电动机三阶模型，同时考虑不同的机械转矩参数，给出了一种计算快速评估法下极限切除时间的方法，分析了转子绕组电磁暂态特性和机械转矩参数对极限切除时间的影响。该方法提高了模型精度，计算更加简便。在 IEEE30 系统中验证了此方法的可行性和可靠性。

## 1 感应电动机模型

感应电动机模型的准稳态等值电路如图 1 所示。

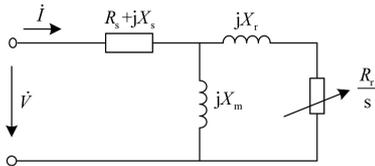


图 1 感应电动机模型的准稳态等值电路

Fig. 1 Quasi steady state equivalent circuit of the induction motor model

图中： $R_s$  为定子电阻； $X_s$  为定子漏抗； $R_r$  为转子电阻； $X_r$  为转子漏抗； $X_m$  为励磁电抗，均为自身容量基值下的标么值。

转子运动方程为

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

式中： $T_j$  为惯性时间常数，单位为秒； $T_e$ 、 $T_m$  分别为电磁转矩和机械转矩； $s$  是电动机负荷转差。

三阶感应电动机机电暂态模型如图 2 所示，三阶模型比一阶暂态模型能更好地描述转子绕组的电磁暂态特性<sup>[19]</sup>。

转子电压方程为

$$\begin{cases} \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E'_q - (X - X')i_d] - (1 - \omega)E'_q \\ \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E'_d + (X - X')i_q] + (1 - \omega)E'_q \end{cases} \quad (2)$$

式中： $X'$ 、 $X$  分别为暂态电抗、转子开路电抗； $E'_d$ 、 $E'_q$  分别为暂态阻抗后电动势的 d 轴、q 轴分量； $i_d$ 、 $i_q$  是 d 轴、q 轴的电流； $T_0$  为暂态开路时间常数； $\omega$  是感应电动机转子转速的标么值。

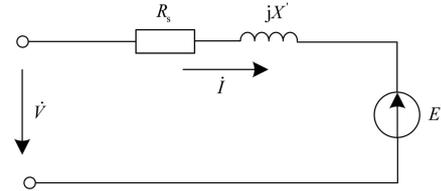


图 2 三阶感应电动机模型的暂态等值电路

Fig. 2 Transient equivalent circuit of three order induction motor model

## 2 故障中感应电动机电磁转矩

### 2.1 一阶感应电动机模型的电磁转矩

感应电动机正常运行、故障时以及故障切除后的机械特性曲线如图 3 所示。

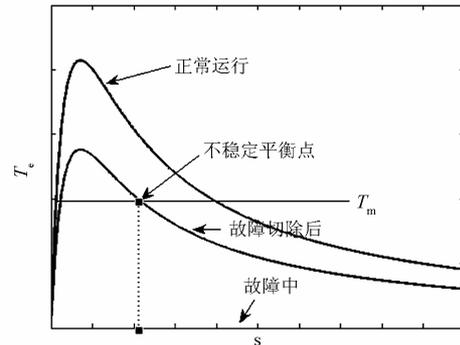


图 3 感应电动机机械特性曲线

Fig. 3 Torque slip curve of induction motors

若负荷母线处发生三相短路接地故障，机械转矩  $T_m$  大于电磁转矩  $T_e$ ，转差  $s$  随时间增大，转子减速。若故障切除后电磁转矩曲线和机械转矩存在交点，则说明故障后有稳定平衡点，其中值较大的交点为临界转差  $s_{cr}$ ，所对应的时间为极限切除时间  $t_{cr}$ <sup>[17]</sup>。若故障持续时间过长，转差超过临界转差  $s_{cr}$ ，则故障切除后感应电动机转速不能恢复，失去稳定。

### 2.2 三阶感应电动机模型的电磁转矩

三阶感应电动机模型计及了转子绕组的暂态特性，负荷母线处发生三相短路接地故障时，暂态电抗后电动势  $E'$  不为 0，电流  $I$  也不会立即变为 0，而是

$$\dot{I} = \frac{-\dot{E}'}{R_1 + jX'} \quad (3)$$

故障中某时刻感应电动机的电磁功率为

$$T_e(t) = E'_d(t) i_d(t) + E'_q(t) i_q(t) \quad (4)$$

三阶感应电动机模型的电磁功率是随时间变化的函数。因此, 转子运动方程可写为

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e(t) \quad (5)$$

故障期间, 三阶感应电动机模型转差  $s$  的变化速度不再完全取决于机械转矩  $T_m$ , 而是取决于机械转矩  $T_m$  和电磁转矩  $T_e$  的差。若  $T_e > 0$ , 则  $T_e$  减小了减速面积, 三阶模型转差  $s$  的增大速度小于一阶模型, 即有利于负荷节点暂态电压稳定; 若  $T_e < 0$ , 则  $T_e$  增大了减速面积, 造成三阶模型转差  $s$  的增大速度大于一阶模型, 不利于负荷节点暂态电压稳定。

### 3 考虑机械转矩方程模型的极限切除时间

#### 3.1 初始转差和临界转差的计算

感应电动机稳定运行时, 用戴维南等效定理把母线和外部系统等效, 只保留负荷母线节点, 如图 4 所示。

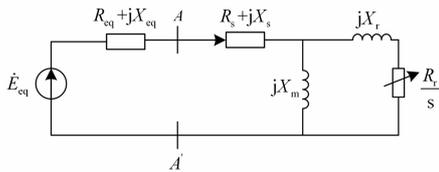


图 4 戴维南等效电路

Fig. 4 Network based on Thevenin's equivalent theorem

图中:  $\dot{E}_{eq}$  是负荷节点外系统的戴维南等值电压, 为恒压源;  $R_{eq} + jX_{eq}$  是负荷节点外系统的戴维南等值阻抗。

此时, 感应电动机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{V_w^2}{\left(R_w + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_w + X_r)^2} \frac{R_r}{s} \quad (6)$$

式中,

$$Z_w = \left[ (R_{eq} + jX_{eq}) + (R_s + jX_s) \right] // (jX_m)$$

$$V_w = \frac{jX_m \dot{V}_{eq}}{(R_{eq} + jX_{eq}) + (R_s + jX_s) + jX_m}$$

令  $T_e = T_m$  可分别求得感应电动机故障前和故障切除后稳定运行时的转差  $s_0$  和  $s_{cr}$ 。

#### 3.2 不同机械转矩下的极限切除时间

感应电动机机械转矩模型数学表达式为<sup>[20]</sup>

$$T_m = k \left[ \alpha + (1-\alpha)(1-s)^{p_m} \right] \quad (7)$$

式中,  $k$  是感应电动机的负荷率, 由稳态运行情况下的感应电动机的电磁转矩和机械转矩相平衡的条件决定, 当  $\alpha$  和  $p_m$  给定时, 应选择  $k$  值使稳态情况下满足电磁转矩等于机械转矩;  $\alpha$  是机械负载转矩中与转速无关的部分所占比例, 即静止阻力矩;  $s$  是转差;  $p_m$  是与机械负荷相关的指数。不同的感应电动机机械转矩模型,  $p_m$  不同。 $p_m = 0$  时,  $T_m$  为常数, 即常用的恒转矩模型。

将机械转矩代入式(5)求定积分可得极限切除时间  $t_{cr}$ , 积分上限为故障切除时的转差率, 积分下限为电动机在正常运行时的转差率  $s_0$ , 初值为故障前稳定状态下的暂态电抗后电动势  $E'$ 。 $t_{cr}$  反映了该节点的暂态电压稳定性。值越大, 节点的暂态电压稳定性越强。反之, 越弱。

### 4 算例

为方便比较, 仍以 IEEE30 系统的节点 3 和节点 4 作为研究对象, 将待评估的母线节点负荷视为 100% 电动机负荷, 其余节点负荷视为恒功率负荷。 $p_m$  取 0、1、2、3 时, 分别对应恒转矩、一次转矩、二次转矩和三次转矩。假设四种机械转矩的感应电动机参数相同, 如表 1。

表 1 感应电动机参数

Table 1 Induction motor parameters

$R_s$	$X_s$	$R_m$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$T_j/s$
0	0.18	0	3.499 1	0.02	0.12	2

#### 4.1 仿真验证

三阶感应电动机模型不同机械转矩下的极限切除时间值计算结果如表 2 所示。节点 3 的  $t_{cr}$  值大于节点 4, 说明节点 3 的暂态电压稳定性要强于节点 4。

表 2 三阶感应电动机模型下不同机械转矩下的  $t_{cr}$  值

Table 2 The critical clearing time comparison of different mechanical torque in three-order induction motor model

节点号	三阶模型的 $t_{cr}$ 值/s			
	恒转矩	一次转矩	二次转矩	三次转矩
3	0.382 9	0.412 8	0.443 5	0.474 2
4	0.303 6	0.331 7	0.345 8	0.373 9

用 BPA 仿真程序对 IEEE 30 节点系统的节点 3 和 4 设置三相接地短路故障, 0.34 s 后切除, 以验

证这 2 个节点的稳定性。仿真结果如图 5。

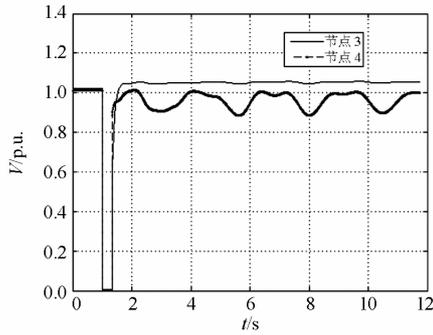


图 5 恒转矩切除时间为 0.34 s，节点 3、4 的暂态电压响应  
Fig. 5 Responses of transient voltage of bus 3 and bus 4 when clearing time is 0.34 s in method

图中可以看出，节点 3 的电压能够在遭受扰动后恢复稳定，而节点 4 则有所下降，节点 3 的暂态电压稳定性要优于节点 4。这是因为仿真切除时间为 0.34 s，小于节点 3 的  $t_{cr}$  值，而大于节点 4 的极限切除时间。仿真结果与本文计算结果相吻合，证明计算方法对负荷节点的暂态电压稳定评估有效。

#### 4.2 对比分析

##### 4.2.1 机械转矩参数对节点暂态电压稳定的影响

由表 2 可知，随着机械转矩的次数增高，极限切除时间增大，说明负荷节点的暂态电压稳定性与感应电动机机械转矩的  $p_m$  有关。 $p_m$  越大的感应电动机越有利于节点的暂态电压稳定，其机理如图 6 所示。 $p_m$  越大其对应的临界转差  $s_{cr}$  越大，极限切除时间  $t_{cr}$  越大，因此越有利。

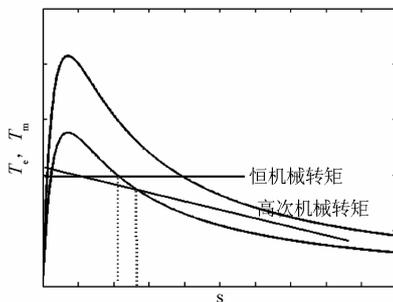


图 6 恒机械转矩和高次机械转矩不稳定平衡点的对比  
Fig. 6 The UEP comparison between constant mechanical torque and higher mechanical torque

##### 4.2.2 感应电动机模型对节点暂态电压稳定的影响

一阶感应电动机模型不同机械转矩下的极限切除时间如表 3 所示。

表 3 一阶感应电动机模型下不同机械转矩下的  $t_{cr}$  值

Table 3 The critical clearing time comparison of different mechanical torque in simple induction motor model

节点号	一阶模型的 $t_{cr}$ 值/s			
	恒转矩	一次转矩	二次转矩	三次转矩
3	0.389 4	0.418 2	0.447 2	0.475 8
4	0.310 4	0.329 4	0.348 6	0.367 6

对比表 2、表 3 可知，一阶模型的极限切除时间  $t_{cr}$  相对乐观，而三阶模型的极限切除时间  $t_{cr}$  较短。其原因是一阶模型忽略了感应电动机暂态特性。故障中，感应电动机的电磁转矩可由式(4)计算求得。设 0 s 时节点 3 发生三相短路故障，三阶感应电动机模型三次机械转矩下的电磁转矩如图 7 所示。

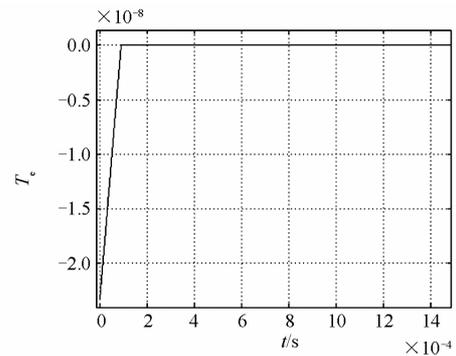


图 7 三阶感应电动机模型三次机械转矩下的电磁转矩  
Fig. 7 Electromagnetic torque of three-order induction motor model under third mechanical torque

由图知，故障瞬间，感应电动机电磁转矩反向为负，并迅速衰减至 0。因为  $T_e < 0$ ，所以增大了减速面积，造成三阶模型转差  $s$  的减速快于一阶模型，但  $T_e$  很快衰减，其值和衰减时间都在  $10^{-4}$  内，所以模型精度对极限切除时间  $t_{cr}$  的影响小于机械转矩参数对极限切除时间  $t_{cr}$  的影响，通过表 2 和表 3 的对比也可证明这一点。

## 5 结论

本文在三阶感应电动机负荷模型基础上，考虑机械转矩变化，给出了动态负荷三相接地短路极限切除时间的计算方法，分析了机械转矩参数和转子绕组电磁暂态特性对极限切除时间  $t_{cr}$  的影响和机理。本文的方法提高了感应电动机模型精度，计算更加简便，是一种快速评估各负荷节点暂态电压稳

定性的有效方法, 可作为动态安全评估系统的一种计算引擎。IEEE30 系统仿真结果表明较高的机械转矩次数有利于负荷节点暂态电压稳定, 而转子绕组的电磁暂态特性不利于负荷节点的暂态电压稳定, 模型精度对极限切除时间  $t_{cr}$  的影响小于机械转矩参数对极限切除时间  $t_{cr}$  的影响。

值得注意的是, 发电机及其励磁系统、网络的拓扑结构、负荷特性及其相关性共同决定了负荷节点的暂态电压稳定性, 本文仅从负荷特性和网络拓扑结构两方面的进行了研究, 发电机和负荷相关性等其他因素的影响还需要进一步讨论。另外, 由等面积定则知, 实际故障的极限切除时间是加速面积与减速面积相等时的时间, 与临界转差所对应的时间有所出入, 但作为快速评估法, 有一定的实用性, 已在实际系统中得到应用。

### 参考文献

- [1] TAYLOR C. Modeling of voltage collapse including dynamic phenomena[R]. CIGRE TF38-02-11, Brochure No. 75, 1993.
- [2] 刘彦呈, 王川, 魏一. 电力系统大扰动下暂态电压稳定的动态特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 11-17.  
LIU Yan-cheng, WANG Chuan, WEI Yi. Dynamic eigen analysis of transient voltage stability under large disturbance for power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 11-17.
- [3] 廖民传, 蔡广林, 张勇军. 交直流混合系统受端电网暂态电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 1-5.  
LIAO Min-chuan, CAI Guang-lin, ZHANG Yong-jun. Transient voltage stability of received power grid in AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 1-5.
- [4] 苏永春, 汪晓明. 基于延拓法的电力系统动态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 12-16.  
SU Yong-chun, WANG Xiao-ming. Power system dynamic voltage stability analysis based on the continuation method[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 12-16.
- [5] 陈文广, 刘明波. 结合详细和准稳态模型的长期电压稳定全过程混合动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 242-251.  
CHEN Wen-guang, LIU Ming-bo. Full-process hybrid dynamic simulation of long-term voltage stability by combination of detailed and quasi steady-state model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 242-251.
- [6] 王爽, 谢敏, 刘明波. 可行性恢复算法求解模型预测长期电压稳定控制问题[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 62-79.  
WANG Shuang, XIE Min, LIU Ming-bo. Feasibility restoration algorithm for solving model predictive long-term voltage stability control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 62-79.
- [7] 顾伟, 万秋兰. 广域电压监控的线性稳定指标[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 110-115.  
GU Wei, WAN Qiu-lan. Linearized voltage stability index for wide-area voltage monitoring and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 110-115.
- [8] 邹德旭, 贺仁睦, 司大军. 负荷模型对电力系统动态稳定的影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 118-122.  
ZOU De-xu, HE Ren-mu, SI Da-jun. Effects of load model on dynamic stability in power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 118-122.
- [9] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 计及感应电动机负荷的静态电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 1-7.  
SUN Hua-dong, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Static voltage stability analysis considering induction motor loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 1-7.
- [10] SEKINE Y, OHTSUKI H. Cascaded voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 250-256.
- [11] 徐泰山, 薛禹胜, 韩祯祥. 感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(6): 12-15.  
XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang. Quantitative analysis for transient voltage instability caused by induction motors[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(6): 12-15.
- [12] EL-SADEK M Z. Voltage instabilities subsequent to short-circuit recoveries[J]. Electric Power Systems Research, 1991, 21(1): 9-16.

- [13] 周双喜, 朱凌志, 郭锡久, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [14] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1-6.  
SUN Hua-dong, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 1-6.
- [15] 马世英, 印永华, 汤涌, 等. 短期和中长期电压稳定仿真及评价[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 14-20.  
MA Shi-ying, YIN Yong-hua, TANG Yong, et al. Simulation and evaluation for short term and mid/long term voltage stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 14-20.
- [16] 徐泰山, 薛禹胜, 韩祯祥. 暂态电压稳定的模型要求和快速判断[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(12): 11-15.  
XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang. Modeling requirements and fast judgment of transient voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(12): 11-15.
- [17] 李立理, 陆超, 黄志刚. 计及感应电动机的负荷节点暂态电压稳定解析评估办法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 1-8.  
LI Li-li, LU Chao, WONG C K. Analytical assessment of transient voltage stability of load bus considering induction motors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 1-8.
- [18] 何笠, 李兴源, 徐梅梅. 考虑动态负荷机械转矩参数的节点暂态电压评估[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 11-16.  
HE Li, LI Xing-yuan, XU Mei-mei. Assessment of transient voltage stability of load bus considering mechanical torque of dynamic load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 11-16.
- [19] 李欣然, 贺仁睦, 周文, 等. 综合负荷感应电动机模型的改进及其描述能力[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 23-27.  
LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHOU Wen, et al. The generalized induction motor model and its description ability to synthetic loads of electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 23-27.
- [20] 刘天琪, 邱晓燕, 李华强. 现代电力系统分析与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

收稿日期: 2013-01-28; 修回日期: 2013-09-12

作者简介:

李 佳(1982-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: scumail@foxmail.com

刘天琪(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。