

动态负荷模型对电力系统暂态稳定的影响

研究了暂态过程中电动机负荷吸收功率波动的机理，故障后不同负荷模型的功率恢复特性，并针对参数和负荷完全对称的两区域四机系统，使用 BPA 仿真研究了送、受端不同电动机负荷比例下，故障后系统的波动情况，从而得到了该模型下送、受端电动机负荷模型对系统暂态稳定性影响不同的结论。该结论对进一步研究负荷模型影响系统暂态稳定性和小扰动稳定性具有参考价值。

王芝茗/国网辽宁省电力有限公司 郭昆亚 金 鹏/国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司 李 砚 蔡志伟/北京丹华昊博电力科技有限公司



王芝茗/教授级高工

研究电力系统的暂态稳定性对其规划、设计和安全运行都具有着重要的意义，而在进行电力系统的暂态稳定计算时，采用不同的负荷模型将很大程度上影响计算的结果^[1-2]。在对华北-华中电网的暂态稳定性进行研究时发现，大量电动机负荷模型的使用会使系统的暂态稳定性被破坏。文献[3]指出电动机负荷模型比例的调整过程会引起故障后系统稳定情况的变化。文献[4]以福州-双龙线的稳定极限作为重要衡量指标，对福建电网的暂态稳定水平进行了计算，得到整个电网采用不同负荷模型时系统的暂态稳定水平完全不同的结构。当对实际负荷特性缺乏了解时，一个普遍的观点认为悲观的负荷模型的采用可以使电力系统的设计和运行处于比较安全的区域内，但由于电力系统的复杂性，不同负荷模型对系统稳定的影响不同，所使用的负荷模型使结果处于乐观还是悲观是难以确定的^[5]。所以，有必要探讨不同负荷模型对系统暂态稳定性的影响情况。

负荷的动特性（功率-电压特性）

功角稳定的过程是各发电机之间、

发电机和负荷之间能量转换及建立新的运行平衡点的过程。因此，负荷模型的功率响应特性对功角暂态稳定的研究有着重要的影响。

考虑到系统频率允许的波动范围较小，且电网较小的频率波动（相对于电压波动而言）对负荷吸收功率所造成的影响较小，以下分别讨论静态负荷模型和电动机负荷模型的功率-电压特性。

1. 静态负荷的功率-电压特性

静态负荷模型通常表示为如下形式（由于电网频率变化较小，忽略频率波动对负荷吸收功率的影响）

$$P = P_0 \left[a_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_p \right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left[a_q \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_q \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_q \right] \quad (2)$$

其中，电压二次项表示恒阻抗负荷，电压一次项表示恒电流负荷，常数项表示恒功率负荷。明显的，静态负荷中，恒阻抗负荷和恒电流负荷受所在节点电压影响的趋势是基本一致的，而恒阻抗负荷吸收的功率受所在节点电压的影响最大，与电压变化的平方成正比。为了反映最严重情况下的情形，本文中所使用的静态负荷模型采用纯阻抗负荷模型进行研究。

2. 电动机负荷吸收功率受机端电压变化影响的机理

图1所示为稳定运行时的电动机在不同机端电压下的静态特性曲线。图1中， S 为感应电动机的转差率， S_{cr} 为临界转差率； T_e 为感应电动机的电磁力矩； T_{e0} 为感应电动机的初始电磁力矩。

由图1可以看出，在静态过程中，当电压迅速跌落时，电动机电磁功率迅速降

关键词/Keywords

电动机负荷模型比例·
暂态稳定性·
联络线功率波动·
功率恢复特性·

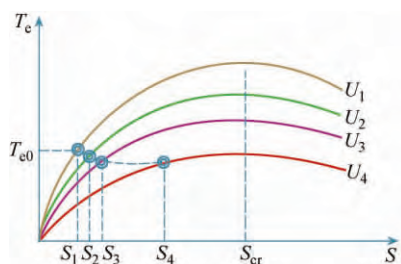


图1 感应电动机静态转矩-转差率特性

低，但转差率不能瞬时突变，因此机械负荷基本不变，电动机减速运行，转差率增大。根据转差率-电压特性，电动机的电磁功率将随着电压的降低而减小，随着转差率的增大而增大。而机械负荷则随转差率增大而减小，当电磁功率与机械负载达到平衡，电动机稳定在新的运行点上^[6,7]。因此，在暂态过程中，电动机转差率、负荷将经过一系列的波动整体以静态稳定指明的方向运动。

3. 故障后不同负荷模型的功率恢复特性

为了研究瞬时性故障后，同一电压恢复过程中，动、静态负荷所吸收功率恢复情况的不同，在某负荷节点上接入等量的静态负荷和电动机负荷，并观察在该节点发生瞬时性故障后，两种负荷类型所吸收功率的波动情况。

图2、图3所示分别为某系统在含有50%电动机负荷的负荷节点发生三相短路瞬时性故障（2周波）时，该节点的电压（见图2）和各部分有功负荷（见图3）的波动情况，其中，电压采用标么值。

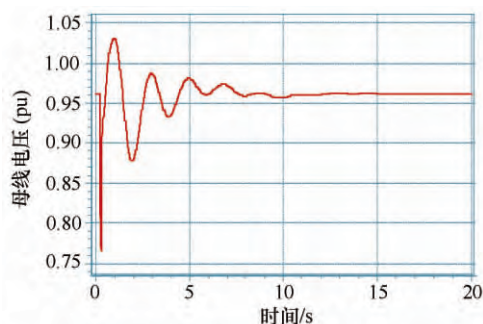


图2 瞬时故障后某节点电压恢复情况

通过观察可知，在故障后系统趋于稳定，电压恢复正常值的情况下，静态负荷、动态负荷的波动趋势和所在节点电压的波动趋势是基本一致的。故障后瞬间，该节点电压急剧下降，节点上的静态负荷和电动机负荷也都随之下降。由于故

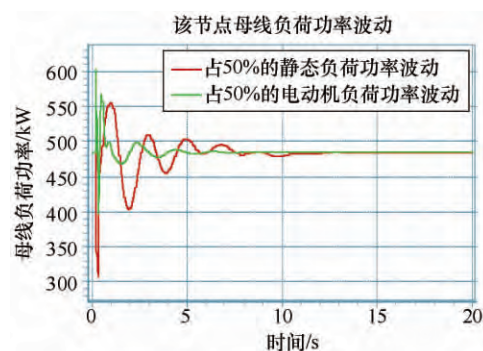


图3 故障后该节点母线负荷功率波动情况

障的消失，该节点电压由0 (pu) 经过一段波动逐步恢复到正常值，静态负荷和电动机负荷吸收的功率也逐步恢复。由于此算例中静态负荷采用恒阻抗负荷模型，这部分负荷所吸收的功率与所在节点电压的平方成正比，所以和该点电压的波动趋势基本一致，只是前者幅度较大。而电动机负荷所吸收的功率在故障消失后能很快恢复，较快地达到稳定，并且在恢复过程中能保持在较高水平。所以，电动机负荷模型所吸收的功率在故障后具有快速恢复特性。

显然，当故障较大，使负荷所在节点的电压波动较大时，电动机负荷所吸收功率的迅速增加可能导致其剧烈波动，甚至造成系统的不稳定。所以，电动机负荷对系统暂态稳定性的影响可能和系统的运行状况及故障类型有关。

两区域四机系统下负荷模型对暂态稳定的影响

上述研究发现，电动机负荷所吸收功率在故障后具有快速恢复特性，这种快速恢复特性对于整个系统暂态稳定性的影响是值得讨论的。为了更清晰地研究电动机负荷模型对电力系统暂态稳定性的影响情况，本文采用典型的两区域四机系统模型进行研究。

1. 模型参数

两区域四机系统能较好地模拟实际电力系统在暂态稳定中功角的相对波动情况、联络线传输功率和节点电压的振荡情况。在该系统中研究得到的结论很大程度上能应用于实际电网，对实际电网的研究有很好的指导作用^[8,9]。图4所示为本文中所研究的两区域四机系统。

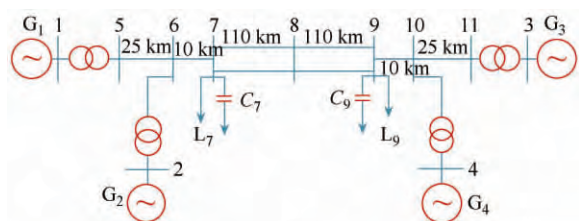


图4 两区域四机系统

为了研究电动机负荷模型比例对系统三相短路瞬时故障后暂态稳定性所造成的影响,而排除可能影响暂态稳定性的其他因素,在本文的仿真中,使两区域四机系统的两个区域完全对称,两区域中采用相同的原动机和发电机模型及参数、相同的励磁系统模型及参数、相同的 PSS 模型及参数,故障点选在系统的正中间位置(见图4中母线8)。

该系统的具体参数^[10]如下: $X_d = 1.8$; $X'_d = 0.3$; $X_q = 1.7$; $T'_{d0} = 8.0$; $D = 5$; $T_j = 13$, $K_a = 20$; $T_a = 0.05$; $r_{line} = 0.0009$ (pu)/km; $x_{line} = 0.0009$ (pu)/km; $B_{line} = 0.000194$; $X_l = 0.15$; $S_{base} = 900$ MV·A; $V_{base} = 230$ kV; $P_{L7} = 1400$ MW; $P_{L9} = 1400$ MW; $Q_{L7} = 75$ Mvar; $Q_{L9} = 75$ Mvar; $Q_{C7} = 275$ Mvar; $Q_{C9} = 275$ Mvar; $P_{G1} = 1050$ MW; $Q_{G1} = 900$ Mvar; $P_{G2} = 1050$ MW; $Q_{G2} = 305$ Mvar; $P_{G3} = 569$ MW; $Q_{G3} = 126$ Mvar; $P_{G4} = 500$ MW; $Q_{G4} = 152$ Mvar。

2. 不同比例电动机模型对该系统暂态稳定性的影响

分别研究位于系统的送端和受端不同比例变化时的电动机模型,对该系统暂态稳定性造成的影响。

通过对 BPA 仿真软件稳定文件内负荷模型 ML 卡中的参数进行调整,可以达到改变电动机负荷占所在母线负荷比例的效果。

(1) 改变送端负荷中电动机负荷的比例

图5、图6所示为改变送端负荷中电动机负荷的比例时,送端负荷所吸收功率的变化情况。从图中可以看出,随着电动机比例的增加,故障后送端负荷吸收的功率波动越来越大。当电动机负荷的比例增加到70%时,系统在6s左右失稳,失稳后母线7吸收的有功负荷明显减少。

送端(母线7)在不同负荷模型下,吸收的有功功率比较

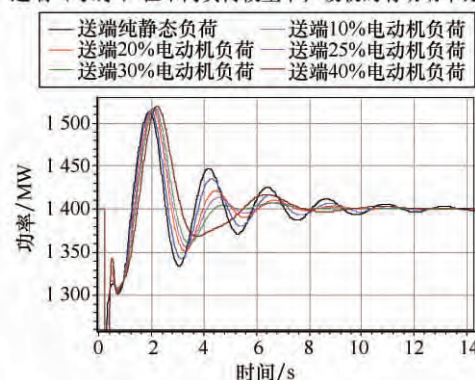


图5 改变送端负荷电动机比例时(0~40%), 送端负荷吸收功率变化情况

送端(母线7)在不同负荷模型下,吸收的有功功率比较

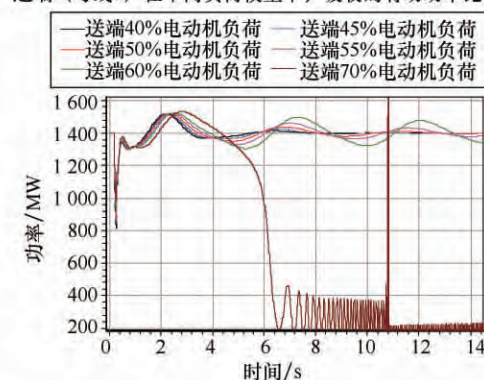


图6 改变送端负荷电动机比例时(40%~70%), 送端负荷吸收功率变化情况

图7、图8所示为改变送端负荷中电动机负荷的比例时,两区域四机系统区域间联络线传输功率的波动情况。从图中可以看出,当电动机负荷的比例从0~40%增加时,随着电动机比例的增加,故障后联络线传输功率波动的第一个波峰值减小,且系统更容易稳定。然而当电动机比例从40%继续增加时,故障后联络线传输功率波动的第一个波峰值减小,但后期波动较大。电动机负荷比例过大(此例中超过70%)时,甚至造成系统的失稳。

(2) 改变受端负荷中电动机负荷的比例

图9、图10所示为改变受端负荷中电动机负荷的比例时,受端负荷所吸收功率的变化情况。从图中可以看出,随着电动机比例的增加,故障后受端负荷吸收的功率波动越来越大。当电动机负荷的比例增加到70%时,系统在2s左右失稳,失稳后母线9吸收的有功负荷明显减少。

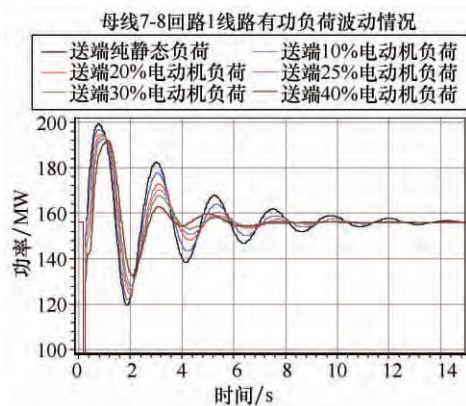


图7 改变送端负荷电动机负荷比例时 (0 ~ 40%) ,
联络线功率变化情况

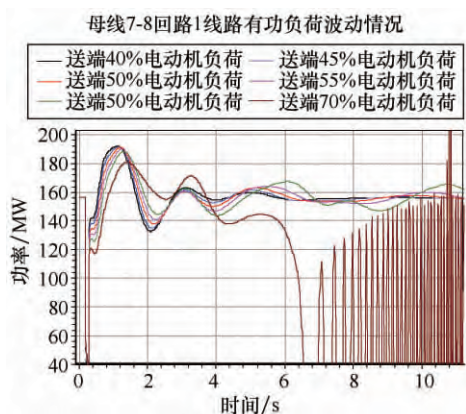


图8 改变送端负荷电动机负荷比例时 (40% ~ 70%) ,
联络线功率变化情况

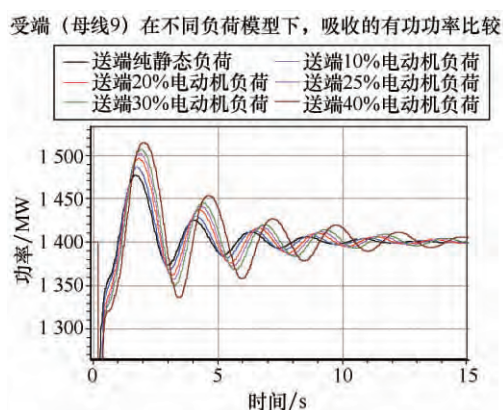


图9 改变受端负荷电动机负荷比例时 (0 ~ 40%) ,
其吸收功率变化情况

图11、图12所示为改变受端负荷中电动机负荷的比例时,两区域四机系统区域间联络线传输功率的波动情况。从图中可以看出,随着电动机负荷的增加,故障后联络线传输功率的波动更严重,当电动机负荷比例过大(此例中超过

受端(母线9)在不同负荷模型下,吸收的有功功率比较

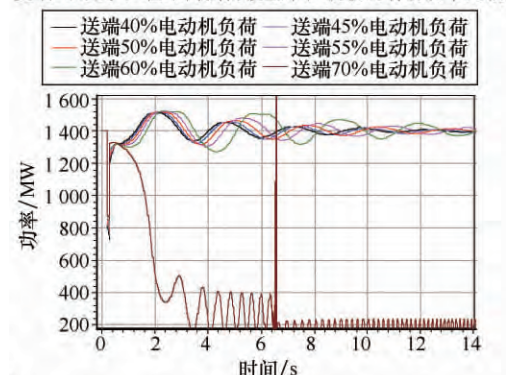


图10 改变受端负荷电动机负荷比例时 (40% ~ 70%) ,
其吸收功率变化情况

70%) 时,甚至造成系统的失稳。

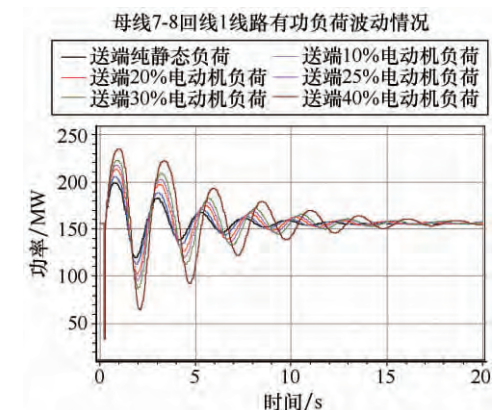


图11 改变受端负荷电动机负荷比例时 (0 ~ 40%) ,
联络线功率变化情况

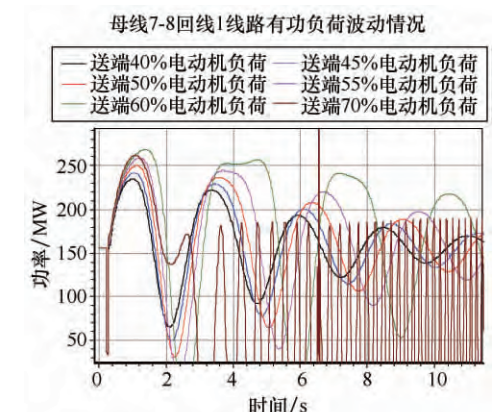


图12 改变受端负荷电动机负荷比例时 (40% ~ 70%) ,
联络线功率变化情况

(3) 比较分析

仿真得到,当某节点电动机负荷的比例增加时,瞬时性故障后,该节点所吸收的功率的波动随之加大。当该节点位于系统的受端时,联络线

传输功率的波动亦随之加大，但当该节点位于系统的送端时，联络线传输功率的波动随着电动机负荷比例的增加先减小后增大。

显然，对于送端而言，故障后负荷吸收的有功功率快速恢复意味着送端机组的有功不平衡量减少，有利于机组稳定。然而，对于受端系统，故障后负荷吸收的有功功率快速恢复将增大受端机组的电磁功率，不利于稳定。因此，当送端电动机负荷比例在一定程度上（如本例中的 0 ~ 40%）增加时，机组容易稳定，联络线功率波动减小；而当受端电动机负荷一定程度上增加时，机组不易稳定，联络线功率波动增大。

又有，过大的电动机负荷比例使故障后负荷恢复过快，恢复过程中波动过大，甚至威胁到系统的稳定性。因此，无论是送端还是受端中过多的电动机负荷都不利于故障后系统的稳定，正如本算例中，这个转折比例为 40%。

(4) prony 分析

对以上不同负荷模型下，系统联络线传输功率的波动情况进行 prony 分析，并进行整理，得到表 1、表 2 所示结果。

表 1 prony 分析结果（改变送端电动机负荷比例）

	振荡频率/Hz	阻尼比
纯静态负荷	0.445 8	0.113 9
送端 10% 电动机负荷	0.440 3	0.143 4
送端 20% 电动机负荷	0.436 9	0.187 0
送端 25% 电动机负荷	0.438 7	0.214 6
送端 30% 电动机负荷	0.445 2	0.239 9
送端 40% 电动机负荷	0.212 0	0.349 0
送端 45% 电动机负荷	0.218 9	0.243 7
送端 50% 电动机负荷	0.218 5	0.157 7
送端 55% 电动机负荷	0.217 4	0.078 5
送端 60% 电动机负荷	0.213 2	0.027 3
送端 70% 电动机负荷	3.571 3	0.002 5

表 2 prony 分析结果（改变受端电动机负荷比例）

	振荡频率/Hz	阻尼比
纯静态负荷	0.445 8	0.113 9
受端 10% 电动机负荷	0.437 3	0.107 8
受端 20% 电动机负荷	0.426 0	0.102 1
受端 25% 电动机负荷	0.419 4	0.098 6

(续)

	振荡频率/Hz	阻尼比
受端 30% 电动机负荷	0.412 4	0.095 4
受端 40% 电动机负荷	0.395 5	0.090 2
受端 45% 电动机负荷	0.384 1	0.087 2
受端 50% 电动机负荷	0.372 3	0.085 5
受端 55% 电动机负荷	0.357 0	0.078 7
受端 60% 电动机负荷	0.328 6	0.070 0
受端 70% 电动机负荷	2.936 6	0.013 4

由表中 prony 分析的结果显示，随着送端电动机负荷比例的增加，系统联络线传输功率振荡的阻尼比先增大、后减小，同时系统的振荡模式发生了改变；随着受端电动机负荷比例的增加，系统联络线传输功率振荡的阻尼比减小，当电动机负荷的比例增加到 70% 时，系统阻尼非常小，振荡失稳，同时系统的振荡模式发生了改变。可见，电动机负荷比例的改变，引起了系统状态方程中某些系数的变化，导致线性化后的系统状态矩阵发生了变化，使整个特征根随之变化。

结束语

- 1) 动态负荷的比例对系统暂态稳定性有影响，其中，送端一定量的电动机负荷有益于系统的暂态稳定性，而受端电动机负荷比例的增加不利于系统的暂态稳定性。
- 2) 无论位于送端还是受端，过量的动态负荷都可能导致瞬时性故障后系统失稳。
- 3) 动态负荷的比例变化会引起系统内阻尼的变化。
- 4) 当静态负荷中恒阻抗、恒电流和恒功率负荷的比例不同时对系统暂态稳定性的影响有待进一步研究。

参考文献

[1] 张景超，鄢安河，张承学，等. 电力系统负荷模型研究综述 [J]. 继电器，2007（6）：83-88.

[2] 王庆红，Thomas J Overbye. 电力系统低频振荡模式参与因子的可视化方法 [J]. 电网技术，2008（10）：74-78.

(下转第 42 页)

电力系统规划的角度来看,这种结合 DG 并网容量、联络开关组合及负荷随机变动的配电网综合优化重构,对提高电力系统的总体运行效益有着重要的参考意义。

参考文献

- [1] 艾芊,郑志宇. 分布式发电与智能电网 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [2] Kim J C, Cho S M, Shin H S. Advanced power distribution system configuration for smart grid [J]. 2013.
- [3] Alvarez-Herault M C, Caire R, Raison B, et al. Optimizing traditional urban network architectures to increase distributed generation connection [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 35 (1): 148-157.
- [4] 张大海,江世芳,赵建国. 配电网重构研究的现状与展望 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (2): 75-76.
- [5] 崔金兰,刘天琪,李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008 (15).
- [6] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (2): 1 401-1 407.
- [7] 邹必昌. 含分布式发电的配电网重构及故障恢复算法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [8] Vitorino R M, Jorge H M, Neves L P. Loss and reliability optimization for power distribution system operation [J]. Electric Power Systems Research, 2013, 96: 177-184.
- [9] Hong H P. An efficient point estimate method for probabilistic analysis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1998, 59 (3): 261-267.
- [10] 吴蓓,张焰,陈闽江. 点估计法在电压稳定性分析中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (25): 38-43.
- [11] 芦晶晶,赵渊,赵勇帅,等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法 [J]. 电网技术, 2013, 37 (8): 2 250-2 257.
- [12] Morales J M, Perez-Ruiz J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (4): 1 594-1 601.
- [13] 曲福娣. 基于点估计法的电力系统随机潮流计算方法 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2011.
- [14] 曾鸣,田廓,李娜,等. 分布式发电经济效益分析及其评估模型 [J]. 电网技术, 2010, 34 (8): 129-133.
- [15] Goswami S K, Basu S K. A new algorithm for reconfiguration of distribution feeders for loss minimization [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1992, 7 (3): 1 484-1 491.
- [16] 刘文霞,赵天阳,邱威,等. 规模化 EV 充电与风力/火电发电系统协调运行 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (5): 49-57.

(收稿日期: 2013-08-26) **EA**

(上接第 33 页)

- [3] 张鹏飞,罗承廉,孟远景,等. 动态负荷模型比例对电网稳定性影响分析 [J]. 继电器, 2006 (11): 24-26, 48.
- [4] 赵勇,张建平. 福州地区负荷模型影响福建电网暂态稳定性的机理 [J]. 电力系统自动化, 2005 (12): 77-82.
- [5] 王卫国. 电力系统动态负荷建模及其有效性验证的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2002.
- [6] 彭谦,马晨光,杨雪梅,等. 线性模态分析中的参与因子与贡献因子 [J]. 电网技术, 2010 (2): 92-96.
- [7] 赵勇,张建平. 福州地区负荷模型影响福建电网暂态稳定性的机理 [J]. 电力系统自动化, 2005 (12): 77-82.
- [8] 鞠平,马大强. 电力系统负荷建模 [M]. 北京: 水利电力出版, 1995.
- [9] 邱丽萍,赵兵,张文朝,等. 综合负荷模型对大区互联电网稳定特性的影响 [J]. 电网技术, 2010 (10): 82-87.
- [10] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

(收稿日期: 2014-09-01) **EA**