

风电场集群接入系统后的聚类分析

范国英, 史坤鹏, 郑太一, 冯利民, 李振元

(吉林省电力有限公司, 吉林省 长春市 130021)

Cluster Analysis of Grid-Connected Large Scale Wind Farms

FAN Guoying, SHI Kunpeng, ZHENG Taiyi, FENG Limin, LI Zhenyuan

(Jilin Electric Power Corporation, Changchun 130021, Jilin Province, China)

ABSTRACT: A cluster grouping algorithm for grid-connected wind farms based on transient voltage characteristics at the connecting point is proposed, namely according to the different impacting extent of system faults on grid-connected wind farms the wind farm groups with similar dynamic behavior are identified, and further the coordinated control of wind farms in the same group can be implemented. To validate the effectiveness of the proposed algorithm, a simulation model of West Jilin power grid is built by advanced visualization software Powerworld and study of cluster analysis is performed. Simulation results show that the calculation results by the proposed algorithm are relatively stable, besides the proposed algorithm possesses a certain function of dynamically identifying grid-disconnected wind farms.

KEY WORDS: low voltage ride through (LVRT); transient voltage; cluster grouping algorithm; West Jilin power grid; dynamic identification

摘要: 提出了一种基于并网点暂态电压特性的聚类分群方法, 即根据并网风电场受系统故障影响程度的不同, 识别出动态行为相近的风电场群, 进而实现同群风电场的协调控制。为验证所提方法的有效性, 在高级可视化软件 Powerworld 建立了吉林西部电网仿真模型, 并进行了聚类分析研究。仿真结果证明, 该算法不仅结果相对稳定、符合电网实际情况, 而且具有一定的脱网风电场动态识别功能。

关键词: 低电压穿越; 暂态电压; 聚类分群方法; 吉林西部电网; 动态识别

0 引言

近几年来, 我国风力发电发展迅速。预计到 2020 年, 内蒙古、甘肃、吉林、新疆、河北、江苏等沿海地区将形成多个千万千瓦级风电基地^[1]。由于风电资源多分布在经济相对落后的偏远地区, 并网点电网结构相对薄弱, 大规模风电集群接入将严

重影响电网的安全稳定运行, 尤其会给局部电网电压稳定带来极大挑战。

随着千万千瓦级风电基地的形成, 风电场群对电网的负面影响日趋明显, 风电场动态稳定性问题已经成为研究的重点。文献[2-4]分析了大容量风电场接入对电网运行带来的稳定问题; 文献[5-6]用实例说明了电网不对称故障对大规模风电场的影响; 文献[7-8]阐述了风电机组低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)机理及其改进措施。以上文献多侧重于风机动态模型的建立及 LVRT 控制技术的改进, 而关于接入系统的风电场群之间的相互影响问题尚需进一步研究。

由于风电场并网点电网的坚强程度、风电机组型号及生产厂家、风机动态无功补偿能力等方面都不同, 导致风电场之间难以协调控制, 从而对风机的 LVRT 性能改造带来新的挑战。为了实现各风电场之间的协调控制、优化无功补偿策略, 建立适合电网实际的风机 LVRT 技术指标^[9], 本文针对大量风电场接入后受系统故障影响的程度不同, 提出一种基于并网点暂态电压特性指标的聚类分群方法, 即利用层次树结构展示各风电场的亲疏关系, 进而识别出暂态行为强相关的风电场群。为验证以上思想, 在电力系统可视化软件^[10-11]Powerworld 中建立了吉林西部电网仿真模型并进行仿真计算, 模型包括 10 个等值风电场。根据仿真曲线及聚类结果可以看出, 该算法分群结果相对稳定、符合电网实际, 还具有一定的跳闸风机动态识别功能。

1 风电场等值模型及其动态分群研究

为便于研究, 在动态仿真时通常将风电场中的大批风电机组集结为一台等值机。为兼顾风电机组的型号和分布, 先对其进行机群划分, 然后分别进行等

值^[12],即用一个等值风力发电机表示一个完整的风电场。风电场集结模型只包括一个简化的风力机等值模型,该模型包含了详细的控制器模型和机械系统表达式。此方法的等值条件是:1)认为在同步速时,等值后电机转子储能与等值前各个电机转子储能之和相等,这种方法只有当电机同调时(也就是暂态过程中电机滑差的偏差相差不大时)才比较合理;2)等值后的风力机扫风面积与等值前相同,即等值前后风力机所捕获的风能相同。对于风机地理位置比较接近的某一风电场,风能分布相对均匀且各风机并网点相同,当风机型号一致时,此等值法比较合理,被不少学者所采用。然而,对于地理位置不同的风电场,此等值条件未必满足,风电场之间表现出很强的非同步特性,基于电机同调特性的等值理论将失去物理意义。

由于电网故障通常会引发电压跌落,因此导致风机为防止暂态过电流损坏其内部电子器件而解列。脱网风机达到一定规模时,将严重影响系统稳定性,因此LVRT问题越来越受到重视。为解决电网故障情况下风机大面积脱网问题,除加强风电机组LVRT性能改造外,还需在风电场并网点电网侧安装大容量动态无功补偿装置来提高系统电压稳定裕度。由于静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static var generator, SVG)及静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等无功补偿装置造价比较高,每个风电场都实现动态无功补偿并不现实。如果将故障承受能力相近的风电场等值为一群,通过对同群风电场的协调控制,不仅便于电力调度部门对大规模风电场群的统一管理,还可以实现无功补偿装置的优化配置。本文提出的基于风电场并网点暂态电压特性的风电场聚类分群方法,可以通过对动态行为相近的风电场进行层次聚类,实现各风电场LVRT能力的有效区分。此方法不涉及风电机具体模型参数,是一种基于电压受扰轨迹的动态分群方法^[13]。机群边界具有模糊性和时变性,其分析结果与并网点网架结构、系统运行方式及故障类型密切相关。

2 聚类分析基本原理

聚类又称为分割,即将样本集合划分为若干类,使类内的样本之间有较高的相似度,而类间的样本差别尽可能大。本文采用文献[14]中的层次聚

类法(又称聚类树方法),其本质上是一种最优化过程,即通过一种快速运算使系统的目标函数达到一个极小值。该目标函数通常以距离为评价标准,如明可夫斯基距离(Minkowski distance)、欧氏距离、切比雪夫距离(Chebyshev distance)和相关系数等。若令 N 为数据维数, x_i 、 x_j 为2个聚类样本,则切比雪夫距离 d_{1ij} 和 d_{2ij} 相关系数指标分别为

$$d_{1ij} = \max_{k=1,2,\dots,N} |x_{ik} - x_{jk}| \quad (1)$$

$$d_{2ij} = \frac{\sum x_{ik}x_{jk} - \frac{\sum x_{ik} \sum x_{jk}}{N}}{\sqrt{(\sum x_{ik}^2 - \frac{(\sum x_{ik})^2}{N})(\sum x_{jk}^2 - \frac{(\sum x_{jk})^2}{N})}} \quad (2)$$

该聚类过程可表示成一个二叉层次树,其脉络清晰、可视化程度高。在聚类过程中,距离指标不同,分类结果可能会不同。因此,在实际应用中,指标的选取必须与专业知识相结合,要求所选距离指标能客观、准确地描述各样本之间的相似关系,并具有明确的物理意义和较强的自适应能力。

3 基于电压暂态特性的聚类指标

风电机组LVRT是指在风机并网点电压跌落时,风机能够保持并网,甚至向电网提供一定的无功支援,直至电网恢复正常,从而“穿越”这个低电压时段。由于各国风机并网标准不同,对低电压穿越能力的要求也不同,图1展示了某风机维持并网运行的电压上、下限边界及其电压受扰轨迹。

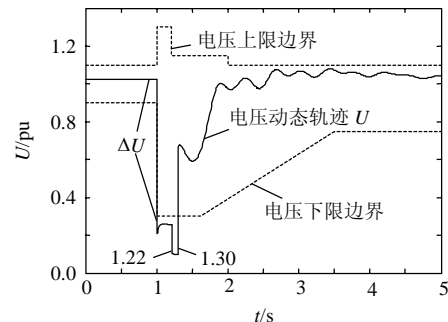


图1 风机出口电压变化轨迹

Fig. 1 The voltage-trajectories of wind-generator

由图1可知,在系统故障期间,当风机并网点电压瞬时值低于给定电压下限(0.3 pu)一定时段时(0.22 s),便会解列脱网。因此,在LVRT电压下限一定的情况下(由风机自身特性决定),并网点电压瞬时跌落程度及故障穿越时间成为影响风机是否LVRT成功的关键。其中,电压跌落程度与电网结构、系统故障类型及位置、无功补偿策略有关,反映了风机出口电压的动态特性。

本文以风机出口电压暂态轨迹为聚类对象^[15], 提出一种基于暂态电压跌落及动态轨迹相关度的聚类指标, 将故障期间动态行为相似的风机进行同群提取。令聚类样本为暂态电压轨迹 v , 则切比雪夫距离满足暂态电压跌落情况, 反映了不同风机受系统故障干扰的严重程度, 属于局部标准; 而轨迹相关系数反映了故障期间动态特性的相似度, 是一种全局标准。各种指标定义如下:

$$\Delta v_k(t_0) = |v_k(t_0) - v_{k0}| \quad (3)$$

$$d_{1ij} = \max |\Delta v_i(t_0) - \Delta v_j(t_0)| \quad (4)$$

$$d_{2ij} = \frac{\sum v_i(t)v_j(t) - \frac{\sum v_i(t)\sum v_j(t)}{N}}{\sqrt{(\sum v_i(t)^2 - \frac{(\sum v_i(t))^2}{N})(\sum v_j(t)^2 - \frac{(\sum v_j(t))^2}{N})}} \quad (5)$$

式中: $\Delta v_k(t_0)$ 为风电场 k 在系统故障时刻电压跌落值; t_0 表示系统故障时刻; v_{k0} 表示故障前并网点稳态电压值; d_{1ij} 为切比雪夫距离, 表示不同风电场在 t_0 时刻暂态电压跌落的不同程度; d_{2ij} 为相关系数, 其物理意义是故障期间不同风电场动态轨迹的整体相似程度。

如果某一系统有 n 个风电场, 则可得到 $n(n-1)/2$ 个相互距离。由于 d_{1ij} 和 d_{2ij} 量纲不同, 引入基于权重距离的综合指标

$$d_{ij} = a(d_{1ij}/\sum d_{1ij}) + (1-a)(d_{2ij}/\sum d_{2ij}) \quad (6)$$

式中 a 为指标 d_{1ij} 的权重值, 本文中 a 取 50%。

如果 d_{ij} 值很小, 则暂态电压跌落程度相近, 说明两风电场受扰后其暂态动态行为相近, 可视为具有同群特性, 否则被划分到不同场群。该聚类方法物理概念清晰, 自适应能力较强, 并且算法简单、耗时少。

4 算例分析

为验证该方法的有效性, 在可视化软件 Powerworld^[9]中, 以吉林省西部松白电网(见图 2)为例进行仿真研究。至 2010 年 8 月底, 该地区共接入风电场 17 个, 总装机容量达 1715 MW, 初步形成了一定规模的风电场群。近年来, 该电网曾发生过系统事故, 导致大批风机因 LVRT 失败而脱网。

为便于计算, 本文主要针对 50MW 及以上 10 个风电场进行了仿真。该系统还包含 6 个火电厂及热电厂, 平衡节点设在长春地区九台厂 500kV 母线。发电机、风电机模型均采用文献^[16]中经典模型及典型参数。线路、变压器及负荷参数均采用实测数据。

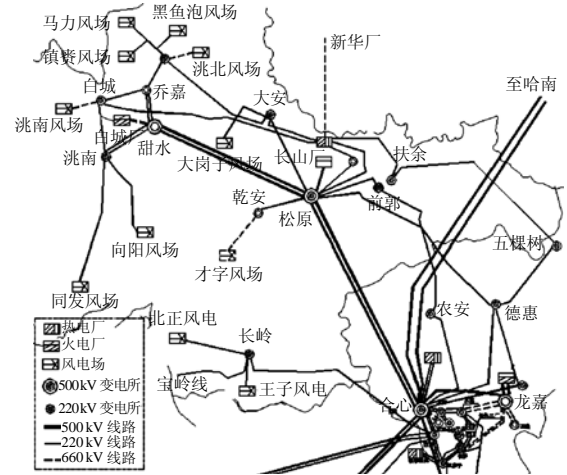
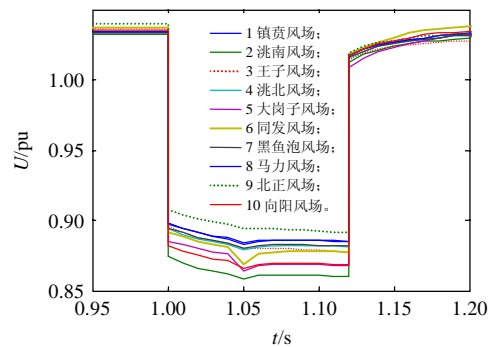


图 2 吉林西部电网地理接线图

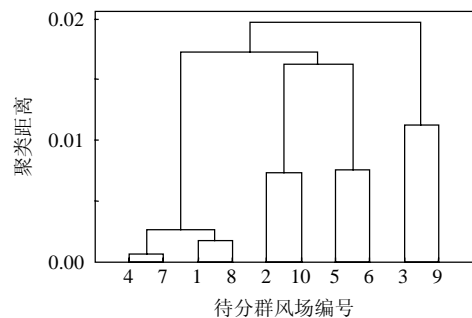
Fig. 2 The geographical diagram of West Jilin power grid

由于电网运行方式、故障类型不同, 风电场分群结果可能不同, 本文以东北电网 2010 年冬大方式为例, 针对 500kV 合松 1 号线路相间短路故障进行暂态仿真。故障点接近合心变, 1s 故障发生, 1.12s 故障切除, 然后本文对 10 个风电场并网点的暂态电压曲线进行聚类分群。为反映不同型号风机的 LVRT 能力, 可以修改风机模型中的 LVRT 下限值, 进而实现电网故障期间对各风机是否脱网的控制。

1) 假设各风电场均 LVRT 成功, 风电场电压受扰轨迹及聚类树型图如图 3 所示, 二叉树型图直观反映了各风电场之间的动态行为相似关系。根据相似程度不同可得到不同的分群结果, 见表 1。图 3(b)



(a) 各风电场电压受扰轨迹



(b) 聚类树型图

图 3 各风电场均 LVRT 成功时各机受扰轨迹及聚类树型图

Fig. 3 Disturbed trajectories and the diagram of clustering-tree when all wind farms succeed in LVRT

表 1 各风电场均 LVRT 成功时基于电压轨迹的分群结果
Tab. 1 The clustering results based on voltage-trajectories when all wind farms succeed in LVRT

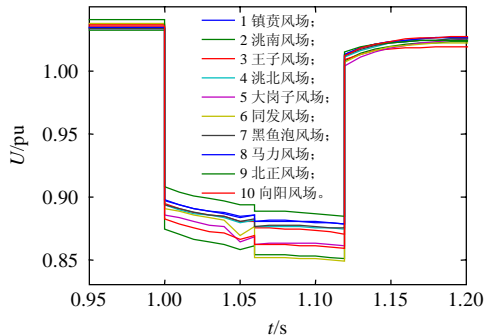
分群数 n	同调机群识别结果
2	{3, 9}, {2, 10, 4, 7, 1, 8, 5, 6}
3	{3, 9}, {2, 10, 5, 6}, {4, 7, 1, 8}
4	{3, 9}, {2, 10}, {4, 7, 1, 8}, {5, 6}

中横坐标 1—10 号风电场分别对应地理接线图 2 中的镇赉、洮南、王子、洮北、大岗子、同发、黑鱼泡、马力、北正及向阳风电场。

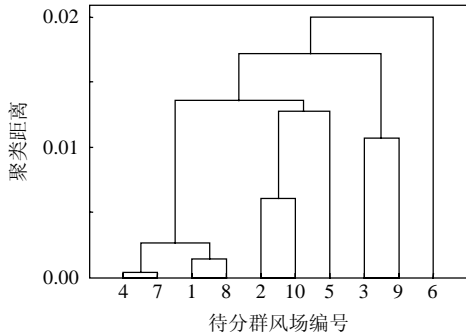
通过比较各风电场地理接线图 2 和表 1 的分群结果可知, 3、9 号风电场独立一群, 单独接入长岭地区, 与白城地区风机有明显的不同群特征; 在白城地区机群内部, 可以继续细分, 尤其是 4、7、1、8 号风电场同群特性最明显, 与它们均“T”接于 220 kV 镇赉变的网架结构相吻合(风电场并网线路均接于马镇线)。由此说明, 风电场并网点的网架结构是影响风机分群的主要因素之一, 进而验证了本文方法的实效性。

2) 为研究风机脱网对系统电压的影响, 假设故障过程中 6 号风电场因 LVRT 能力较差发生解列脱网, 各场电压受扰轨迹和聚类分群结果如图 4 和表 2 所示。

由图 4(a)可见, 由于 6 号风电场在 1.06 s 时刻解列脱网, 将对系统其他风电场形成二次冲击, 各风电场出口电压均不同程度的再次下降。由于 6 号



(a) 各风电场电压受扰轨迹



(b) 聚类树型图

图 4 6 号风电场解列脱网后各机受扰轨迹及聚类树型图
Fig. 4 Disturbed trajectories and the diagram of clustering-tree when wind farm 6 disconnects from grid

表 2 基于电压轨迹的分群结果

Tab. 2 The clustering results based on voltage-trajectories when wind farm 6 disconnects from grid

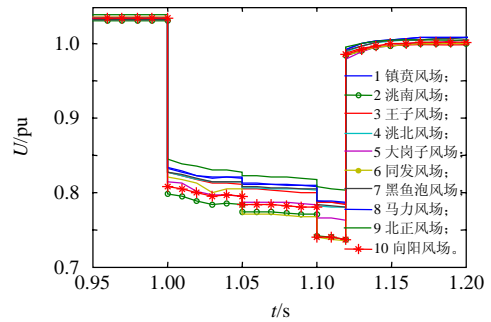
分群数 n	同调机群识别结果
2	{3, 9, 2, 10, 4, 7, 1, 8, 5}, {6}
3	{3, 9}, {2, 10, 4, 7, 1, 8, 5}, {6}
5	{3, 9}, {2, 10}, {4, 7, 1, 8}, {5}, {6}

风电场解列时出口电压跌落程度最大, 聚类算法将其单独分割出来(见图 4(b)), 证明本文所提算法可识别风电场脱网情况。

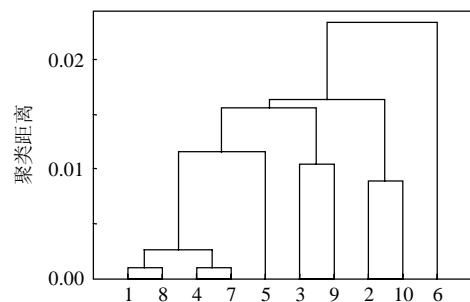
另外, 通过图 4(a)可知, 某一风电场脱网将导致系统其他各节点电压发生 2 次跌落, 严重情况下可能导致其他风电场相继脱网。

3) 假设线路相间故障程度加重(短路阻抗变小), 再次进行暂态仿真, 其结果如图 5 和表 3 所示。

由图 5(a)可知, 此故障过程中, 6 号风电场在 1.05 s 首先跳闸, 对电网造成二次冲击; 2、10 号风电场因电压 2 次跌落后低于其电压下限值, 在 1.1 s 时也发生跳闸, 导致电压 3 次跌落, 严重情况下可能造成更多风场脱网。比较表 2、3 和图 4、5 发现,



(a) 各风电场电压受扰轨迹



(b) 聚类树型图

图 5 线路相间故障程度加重时各机受扰轨迹及聚类树型图
Fig. 5 Disturbed trajectories and the diagram of clustering-tree when extent of phase-to-phase faults advances

表 3 线路相间故障程度加重时基于电压轨迹的分群结果
Tab. 3 The clustering results based on voltage-trajectories when extent of phase-to-phase faults advances

分群数 n	同调机群识别结果
2	{3, 9, 2, 10, 4, 7, 1, 8, 5}, {6}
3	{3, 9, 4, 7, 1, 8, 5}, {2, 10}, {6}
5	{3, 9}, {4, 7, 1, 8}, {5}, {2, 10}, {6}

3 群模式下, 表 3 将跳闸后的 2、10 号场群和 6 号风电场均有效提取出来, 由此可知, 此算法具有较强的脱网风电场动态识别功能。

5 结论

1) 集群接入系统的大规模风电场具有一定的同群特征, 但受地理位置、网架结构及系统冲击大小等因素影响。

2) 采用基于并网电压暂态轨迹的聚类分群方法, 将风电场按 LVRT 能力强弱进行有效划分, 从而为风电场统一管理、性能改造及其协调控制奠定了基础。

3) 风机脱网现象表现出一定的非线性特点, 一台风机脱网对系统电压造成二次冲击, 可能导致其他风机相继脱网, 扩大事故范围, 给系统稳定运行带来极大隐患。

4) 如何将风电场动态分群结果和电网无功电压分层分区进行有效结合, 进而实现大规模风电接入地区的无功补偿协调控制是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 喻新强. 西北电力系统如何应对大规模风电开发与利用[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(8): 1-6.
Yu Xinqiang. Northwest power system faces challenges arising from large-scaled wind power development and utilization[J]. Power Systems and Clean Energy, 2009, 25(8): 1-6(in Chinese).
- [2] 张红光, 张粒子, 陈树勇, 等. 大容量风电场接入电网的暂态稳定特性和调度对策研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 45-51.
Zhang Hongguang, Zhang Lizhi, Chen Shuyong, et al. Studies on the transient behavior and dispatching strategy of power system integrated with large scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 45-51(in Chinese).
- [3] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 76-80.
Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 76-80(in Chinese).
- [4] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
Huang Xueliang, Liu Zhiren, Zhu Ruijin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149(in Chinese).
- [5] 周双喜, 郑伟, 刘峻, 等. 电网电流不对称引起大规模风机跳闸原因分析[J]. 中国电力, 2010, 43(3): 63-67.
Zhou Shuangxi, Zheng Wei, Liu Jun, et al. Analyzing on large-scale wind generator trip caused by power grid current asymmetry[J]. Electric Power, 2010, 43(3): 63-67(in Chinese).
- [6] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟, 等. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87-91.
Zhao Zilong, Wu Weining, Wang Wei, et al. A low voltage though technology for direct-drive wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 33(21): 87-91(in Chinese).
- [7] 闫广新, 杨增强, 李江. 变速双馈风电机组低电压穿越功能仿真分析[J]. 华东电力, 2009, 37(4): 73-76.
Yan Guangxin, Yang Zengqiang, Li Jiang. Simulative analysis of low voltage ride-through capability of variable speed doubly-fed wind generator[J]. East China Electric Power, 2009, 37(4): 73-76(in Chinese).
- [8] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
He Yikang, Zhou Peng. Over of the low voltage through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146(in Chinese).
- [9] 迟永宁. 中国的风电并网研究与并网导则制订[C]//中德风电并网技术研讨会. 北京: 中国电力科学研究院, 2008: 1-41.
- [10] 王庆红. 电力系统可视化技术及其在南方电网的应用[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(3): 40-44.
Wang Qinghong. Power system visualization technology and its application in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(3): 40-44(in Chinese).
- [11] Glover J D, Sarma M S. Power system analysis and design[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 23-29.
- [12] 吴俊玲. 大型风电场并网运行的若干技术问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [13] 戴晨松, 薛峰, 薛禹胜. 受扰轨迹的分群研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 13-16.
Dai Chensong, Xue Feng, Xue Yusheng. Classification of disturbed trajectories[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 13-16(in Chinese).
- [14] 史坤鹏, 穆钢, 李婷, 等. 基于经验模式分解的聚类树方法及其在同调机组分群中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 21-25.
Shi Kunpeng, Mu Gang, Li Ting, et al. Empirical mode decomposition based clustering-tree method and its application in coherency identification of generating sets[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 21-25(in Chinese).
- [15] 张忠静, 陈刚, 张学君. 基于最优聚类原理的电网无功电压分区算法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(5): 65-69.
Zhang Zhongjing, Chen Gang, Zhang Xuejun. Partition algorithm of power network based on the optimum clustering principle[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(5): 65-69(in Chinese).
- [16] Clark K, Miller N W, Sanchez-Gasca J J. Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies[M]. New York: General Electric International, Inc., 2009: 44-67.



范国英

收稿日期: 2011-05-24.

作者简介:

范国英(1965), 女, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统规划与运行管理工作, E-mail: fangy@jl.sgcc.com.cn;

史坤鹏(1981), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统调度运行方面的工作, E-mail: kumpengshi2005@163.com;

郑太一(1959), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统规划与运行管理工作, E-mail: zhengty@jl.sgcc.com.cn.

(责任编辑 杜宁)