

基于节点灵敏度分析的大电网等值研究

武艳¹, 杨数强¹, 蒋志勋²

(1. 洛阳师范学院物理与电子信息学院, 河南 洛阳 471022; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 采用 REI 法进行大电网等值时会出现等值输电线路电阻为负值、与实际不符的情况, 分析得知产生这一问题原因在于等值过程中没有对外部系统的节点进行区分, 以至于对研究系统稳态特性和暂态特性影响大、关联性强的关键节点被消去。针对此问题提出利用节点灵敏度分析的方法, 即根据网络功率修正方程定义系统无功功率灵敏度矩阵和有功功率灵敏度矩阵。并结合电网实际灵敏度度量值, 提出可判断外部系统等值过程中必须保留的关键节点的方法, 并将此过程引入大电网同调等值法中。利用 BPA 仿真软件以新英格兰标准 39 节点系统为测试算例, 采用改进后的同调等值法对外部系统进行简化等值, 利用等值后系统稳态特性和暂态特性验证该方法的正确性和可行性。

关键词: REI 法; 灵敏度分析; 同调等值; BPA

Research on the equivalence of large-scale power system using node sensitivity analysis approach

WU Yan¹, YANG Shuqiang¹, JIANG Zhixun²

(1. College of Physics and Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China;

2. Changjiang Institute of Planning, Design and Research, Wuhan 430000, China)

Abstract: Using the method REI to simplify the large-scale power system, the equivalent resistance of electric transmission line is maybe negative; such things don't tally with the reality. The cause of this problem is that the nodes in external systems aren't distinguished in the process of equivalence, so that the key nodes which make a big difference with the researched system's stationary and transient characteristics, and have strong correlation with the researched system are eliminated. Aiming at this problem the node sensitivity analysis approach is proposed; according to the network power correction equations to define the system's reactive power and active power sensitivity matrix, and combining the practical measurement sensitivity of the grid, the method to estimate the key nodes in external systems which must be reserved is put forward; and this process is introduced in coherent-based equivalence of large-scale power system. Using BPA simulation software and taking the New England standard 39-node system as the test example, the external system is simplified by the improved coherent-based equivalence method; the validity and the feasibility of this method is verified by the stationary and transient characteristics of the equivalent system.

Key words: the method REI; sensitivity analysis; coherent-based equivalence; BPA

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)10-0068-06

0 引言

目前, 我国电力系统处于快速发展时期, 逐步形成了全国性的大规模特高压互联电网, 并且随着直流输电技术的发展以及 FACTS、SVC 等电力电子设备在电力系统中的应用, 系统的动态特性也日

趋复杂。由于计算机容量和仿真软件对电网规模的限制, 直接对如此大规模的电网进行计算与分析是十分困难的^[1-2]。实际上在对大电网分析时, 通常只对系统中某一部分感兴趣, 称之为研究系统, 而对其余部分不感兴趣, 但它对研究系统的影响不能忽略, 称之为外部系统。为了减轻暂态稳定仿真的计算量, 需要将外部系统进行简化, 即需要对外部电网进行电网等值。

REI(辐射等值独立)法是电网等值常用的方法之一; 但通过实际应用发现采用 REI 法对电网进行

基金项目: 河南省科技厅攻关重点项目 (112102210337); 河南省教育厅科学技术重点研究项目 (14A320029 2.0, 1405 jy013)

等值时,有时会出现等值网络中输电线路电阻为负的情况,这样的等值结果不被认可。分析得知产生这一问题的原因在于等值过程中没有对外部系统的节点进行区分,以至于对研究系统稳态和暂态特性影响大、关联性强的关键节点被消去^[3]。针对此问题提出利用节点灵敏度确定外部系统关键节点的方法;并将此过程引入大电网同调等值法中,通过对测试算例的仿真可验证该方法的正确性与可行性。

1 灵敏度分析

灵敏度是控制系统的一项基本性能指标,可反映系统在特性或参数改变时偏离正常运行状态的程度;其数学表达为系统输出对系统参数的偏微分。由于灵敏度计算简单概念明确,所以基于灵敏度的分析方法易于实现,如文献[4-10]所述已在电力系统电压稳定性分析、预测电力系统切负荷的控制方法、大电力系统和高压直流输电可靠性评估、确定电力系统无功补偿地点等领域得到了深入广泛应用。

本文拟将灵敏度分析法与网络功率方程相结合,并将其引入到电网等值关键节点保留研究中。在网络功率方程中,网络参数 G 、 B 为恒定不变的常数;控制变量为PQ节点(负荷节点)的有功功率 P_L 和无功功率 Q_L 、PV节点(发电机节点)的有功功率 P_g ,以及平衡点的电压大小和相位角;状态变量为PQ节点的电压大小 U_L 与电压相位角 δ_L ,以及PV节点的电压相位角 δ_g ;而输出变量为PV节点的无功功率 Q_g 、平衡节点的有功功率和无功功率等^[11]。

牛顿-拉夫逊迭代算法网络功率修正方程式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

在交流高压电网中,网络元件电抗远远大于电阻的值,以致各节点电压相位角的改变主要影响各元件的有功功率,各节点电压大小的改变主要影响各元件的无功功率;所以可以将式(1)中的子阵 \mathbf{N} 、 \mathbf{M} 略去。则网络功率修正方程式可以简化为^[12]

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,子阵 $\mathbf{H} = -\frac{\partial P}{\partial \delta}$, $\mathbf{L} = -\frac{\partial Q}{\partial U}$ 。

由式(2)推导出各节点电压大小变化与无功功率变化之间的关系表达式为

$$\Delta U = -\mathbf{L}^{-1} \Delta Q = \mathbf{K} \Delta Q \quad (3)$$

式中,矩阵 $\mathbf{K} = -\mathbf{L}^{-1}$,可称为无功功率灵敏度矩阵,反映了节点无功功率变化对节点电压大小变化的影

响。无功功率增量 ΔQ_g 引起节点 i 电压大小的变化量可表示为

$$\Delta U_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} \Delta Q_j \quad (4)$$

式中, n 为系统PQ节点个数。若 k_{ij} 很小,则表示节点 j 的无功功率变化 ΔQ_j 对节点 i 的电压大小变化 ΔU_i 的影响可以忽略不计。

同理,可定义有功功率灵敏度矩阵 $\mathbf{C} = -\mathbf{H}^{-1}$,反映节点有功功率变化对节点电压相位角变化的影响。有功功率增量 ΔP_j 引起节点 i 电压相位角的变化量可表示为

$$\Delta \theta_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} \Delta P_j \quad (5)$$

式中, m 为系统PQ节点个数。

若外部系统中的节点都属于集合 O ,连接研究系统和外部系统的边界节点都属于集合 B ;用 S_U 表示 O 中节点对 B 中节点电压大小灵敏集合, S_θ 表示 O 中节点对 B 中节点电压相位角灵敏集合。可根据灵敏度的大小确定出外部系统中对边界节点灵敏度高的节点,在电网等值中这些节点应作为关键节点得以保留。即保留节点应满足以下条件。

$$S_U = \{j \mid |k_{ij}| > \xi U_{ij}\} \quad i \in B, j \in O \quad (6)$$

$$\text{或者 } S_\theta = \{j \mid |c_{ij}| > \xi \theta_{ij}\} \quad i \in B, j \in O \quad (7)$$

式中: ξU_{ij} 为电压大小灵敏度度量值,与节点 i 的允许电压偏移和节点 j 的无功功率最大波动范围相关; $\xi \theta_{ij}$ 为电压相位角灵敏度度量值,与节点 i 的允许相位角变化范围和节点 j 的有功功率最大波动范围相关;可由式(8)求得。

$$\xi U_{ij} = \frac{U_i \cdot \sigma U}{|Q_j| \cdot \sigma Q}, \quad \xi \theta_{ij} = \frac{\Delta \theta}{|P_j| \cdot \sigma P} \quad (8)$$

式中: σU 为节点 i 允许电压偏移百分数; σQ 为节点 j 无功功率变化范围百分数; $\Delta \theta$ 为节点 i 允许相位角变化范围,采用弧度表示; σP 为节点 j 有功功率变化范围百分数。可见, ξU_{ij} 和 $\xi \theta_{ij}$ 的大小与 σU 、 σQ 和 $\Delta \theta_i$ 、 σP 的取值有关,在电网不同的运行状态下,它们的取值也有所不同;根据实际电网运行经验,一般来说 σU 可取0.002~0.012, $\Delta \theta$ 可取0.07~0.15, σQ 和 σP 可取0.5~0.9。由式(8)得知, ξU_{ij} 和 $\xi \theta_{ij}$ 值越小,等值时需要保留的关键节点越多,电网等值简化程度越低,但准确性越高;所以 ξU_{ij} 和 $\xi \theta_{ij}$ 阈值的确定应综合考虑电网简化要求和准确性要求。

2 同调等值法步骤

同调等值法是针对较大规模电力网进行等值时经常应用和较为成熟的等值方法。其具有以下优点：物理概念清楚，等值后网络元件模型均为实际电力系统元件模型；可直接用于电力系统暂态稳定性分析，对系统的非线性和大扰动适应性强；等值精度控制较方便等等^[13-16]。

考虑到在网络化简时需要保留外部系统的关键节点，对同调等值法可进行必要的改进，改进后的同调等值法分为以下几个步骤：

- (1) 划分研究系统和外部系统，确定连接研究系统和外部系统的边界节点。
- (2) 判别外部系统中的同调发电机群，对同调发电机母线作合并化简。
- (3) 同调发电机作动态聚合，得出聚合后等值机的参数。
- (4) 按照上述灵敏度分析方法确定外部系统中必须保留的关键节点，并在网络化简过程中予以考虑保留。
- (5) 网络化简；目前最常用的网络等值方法为 CSR 法和 REI 法；测试发现采用这两种方法等值后系统的稳态特性较为相似，但采用 REI 法等值后系统暂态特性曲线拟合程度更高，所以选取 REI 法进行网络化简。

3 实例测试与分析

这里采用图1所示的新英格兰标准39节点系统作为测算系统。

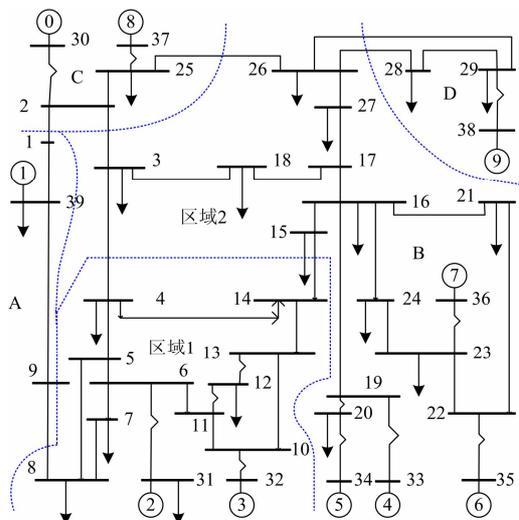


图1 新英格兰标准39节点系统接线图

Fig. 1 Connecting diagram of New England standard 39-node system

其中，区域1作为研究系统，区域2作为待简化等值的外部系统；区域2按照电气距离分为A~D四个区域；区域1中的2号发电机作为系统的平衡节点；节点9、3、15是联系区域1和区域2的边界节点。如采用模糊聚类法判别出同调机群，并对同调机群进行聚合，区域C中的两台发电机G0、G8等值为等值机EGC，区域B中的四台发电机G33、G34、G35、G36等值为等值机EGB。

3.1 不保留关键节点等值结果与分析

利用电力系统计算分析仿真软件 BPA、并采用 REI 法对外部系统进行等值。等值的结果为：边界节点全部保留、外部系统中所有非发电机节点全部消灭；等值网络中节点 15 与等值机 EGC、节点 15 与发电机 G9、等值机 EGB 与等值机 EGC、等值机 EGB 与发电机 G9 之间的等值线路电阻全部为负值，网络呈现出病态，等值结果不被认可；并且每两台等值机之间均由很长的等值线路连接，这与实际电网运行不相符，不能利用软件进行有效分析。

产生以上问题的原因是采用 REI 法进行负荷母线化简时需将负荷转移到外部一个或少数几个虚拟节点上，在负荷转移过程中发生了负荷遗失；同时外部系统缺少中间节点，以致等值机直接相连^[17-18]。通过测试发现，若保留外部系统中的关键节点上述问题可得以解决。

3.2 保留关键节点等值结果与分析

3.2.1 网络等值

在电网等值过程中，依经验连接外部系统两非同调机组的一个中间节点一般要求保留；除此以外，可采用灵敏度分析的方法确定出要保留的节点。按照式(2)~式(5)可分别计算出外部系统的节点对边界节点 9、3、15 的电压大小灵敏度和相位角灵敏度相对较大的节点。根据式(6)、式(7)可判断外部系统节点对边界节点 9、3、15 灵敏的关键节点为节点 24、27，在等值过程中应予以保留；并保留非同调机组(G0、G8)和 G9 之间的节点 26，利用 BPA 并采用 REI 法对新英格兰标准 39 节点系统进行等值^[19]，等值结果如图 2 所示。

等值前系统接线图 1 与等值后系统接线图 2 对比可知，等值后的网络从原外部系统 8 台发电机、24 个节点减少为 4 台发电机，3 个节点，网络规模有很大简化；并且与不保留关键节点相比，等值线路的电阻都为正值。

3.2.2 等值结果测试

对等值后的系统进行仿真分析，外部系统与研究系统联络线上的潮流与等值前基本吻合，如表 1 所示；等值后研究系统节点电压基本没有变化，如

表 2 所示; 说明采用该方法进行电网等值, 稳态特性满足要求。

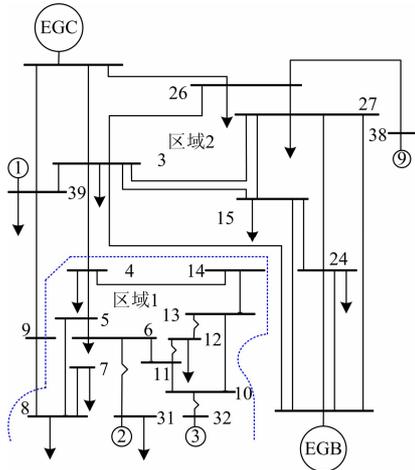


图 2 等值网络接线对比图

Fig. 2 Contrast connecting diagram of equivalenced network

表 1 系统联络线潮流

Table 1 Power flow of link line

线路名	原系统联络线潮流	等值系统联络线潮流
bus_3-bus_4	92.8+j110	89.6+j110.2
bus_9-bus_8	20.1+j70.1	19.1+j70.1
bus_15-bus_14	5.1-j35.8	5.4-j35.7

表 2 研究系统节点电压

Table 2 Node voltage of researched system

节点	电压大小/p.u.	电压相位角/(°)
	(等值前/等值后)	(等值前/等值后)
4	1.004/1.004	-9.6/-9.6
5	1.005/1.005	-8.6/-8.6
6	1.007/1.008	-7.95/-8.0
7	0.997/0.997	-10.13/-10.1
8	0.996/0.996	-10.62/-10.6
10	1.017/1.017	-5.43/-5.4
11	1.012/1.013	-6.28/-6.3
12	0.988/0.988	-6.24/-6.3
13	1.014/1.014	-6.1/-6.1
14	1.012/1.011	-7.7/-7.7
31	0.982/0.982	0/0
32	0.983/0.983	2.57/2.6

对于等值后系统暂态特性, 可在研究系统的线路上设置三相短路故障, 观测研究系统中发电机的转子摇摆曲线、联络线功率变化曲线以及节点电压变化曲线与等值前拟合程度来判断等值后系统的暂态特性是否满足要求。例如设置节点 13 与节点 14 之间线路末端发生三相永久性故障 0 s 时开始, 0.1 s 时跳开线路两侧三相开关, 分别对不保留关键节点 24、27 与保留关键节点 24、27 的等值网络暂态特

性曲线与原系统的进行对比, 系统暂态特性部分曲线如图 3~图 6 所示。

从图 3 所示的发电机摇摆曲线可以看出, 故障后 0~6 s 发电机转子剧烈摇摆过程中, 保留关键节点 24、27 的转子摇摆曲线与原始系统的摇摆曲线基

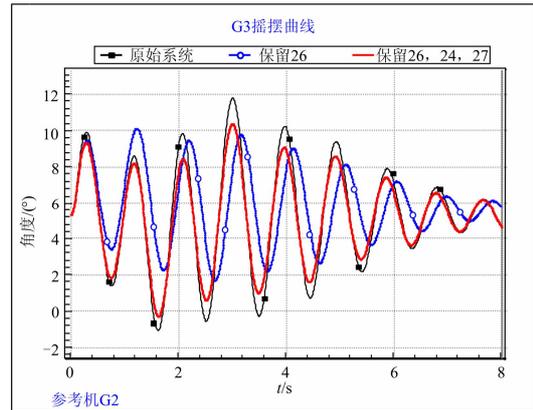


图 3 研究系统发电机 G3 摇摆曲线

Fig. 3 Generator G3 rocking curve of researched system

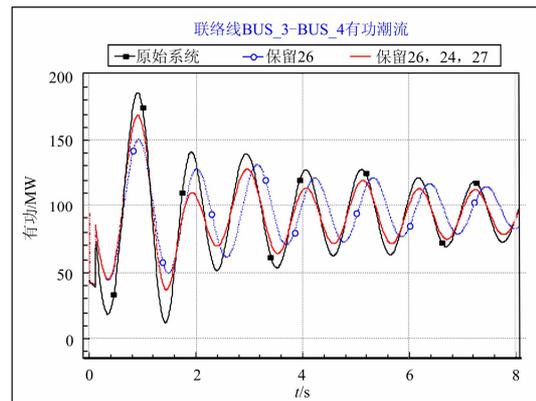


图 4 联络线 bus_3-bus_4 有功潮流变化曲线

Fig. 4 Active power flow curve of link bus_3-bus_4

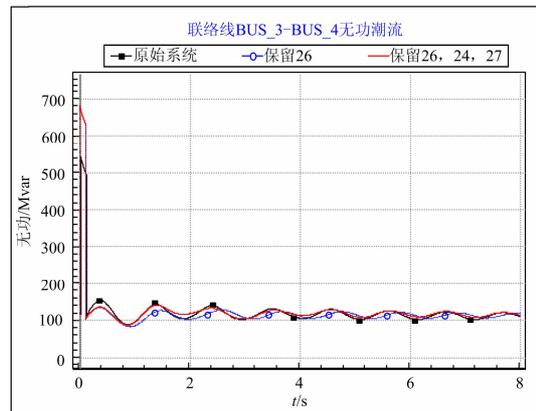


图 5 联络线 bus_3-bus_4 无功潮流变化曲线

Fig. 5 Reactive power flow curve of link bus_3-bus_4

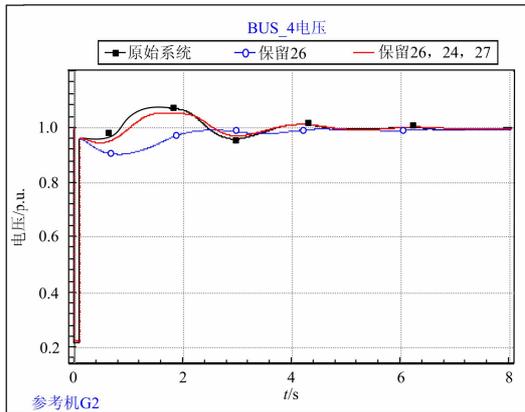


图6 研究系统 bus_4 电压变化曲线

Fig. 6 Bus_4 voltage curve of researched system

本拟合，特别从故障后 6 s 开始两曲线完全重合；而不保留节点 24、27 的转子摇摆曲线与原始系统的摇摆曲线相比，从故障后 0.1 s 开始两者差异逐渐增大。说明利用保留节点 24、27 的等值系统替代原始系统较不保留节点 24、27 而言，其对研究系统发电机暂态特性的影响与原系统的更为相近。

由图 4 联络线有功潮流变化曲线可知，等值网络不保留节点 24、27 情况下，从故障后 2 s 开始线路有功功率的振荡频率与原系统的有很大差异；而保留节点 24、27 情况下，故障后线路有功功率的振荡频率始终与原系统保持一致，并且有功功率大小基本相等。由图 5 联络线无功潮流变化曲线可知，等值网络不管保留、不保留节点 24、27，故障后联络线无功功率变化的情况与原系统的都很相似，但在保留节点 24、27 的情况下，联络线的无功功率曲线与原系统的更为贴近、误差更小。说明利用保留节点 24、27 的等值系统替代原始系统较不保留节点 24、27 而言，重要线路的潮流变化情况与原系统的更为相近。

由图 6 所示的研究系统电压变化曲线可以看出，不管等值系统保留、不保留节点 24、27，在故障 4 s 以后，研究系统节点电压变化曲线都与原系统的趋于一致；但在故障后 0~4 s 时间内，保留节点 24、27 时与不保留时相比，研究系统节点电压大小与原系统的更为接近。即利用保留节点 24、27 的等值系统替代原始系统，研究系统节点电压的变化过程与原系统的更为相近。

由此可见，在电网等值时按照节点灵敏度分析的方法判断并保留外部系统中的关键节点，等值网络暂态特性曲线较不保留这些节点的暂态特性曲线与原系统的暂态特性曲线拟合程度有很大提高，说明若采用 REI 法对电网等值时保留对边界节点敏感

的外部系统的关键节点，得到的等值网络暂态特性与原系统的更加相近，即等值网络的有效性和准确性更高。

4 总结

采用 REI 法对电网进行等值时，为了使等值效果准确可靠，外部系统的关键节点必须予以保留。关键节点的判断可采用节点灵敏度分析的方法，将外部系统中节点功率变化对边界节点电压影响较大的节点确定为关键节点，若将这些节点在等值过程中予以保留，得到的等值系统稳态特性基本没有变化，暂态特性较不保留关键节点时准确性有很大提升，并且该方法简单易行，得到的等值网络规模和精度都可满足工程要求，为电网等值方法的改进提供了新思路。

参考文献

- [1] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137, 147.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137, 147.
- [2] 韩祯祥, 薛禹胜, 邱家驹. 2000 年国际大电网会议系列报道——电网互联的现状和前景[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24): 1-4.
HAN Zhenxiang, XUE Yusheng, QIU Jiaju. A review of CIGRE 2000 on power system interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(24): 1-4.
- [3] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 基于社团结构理论的电网无功分区及主导节点选择方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 32-37.
PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Improved network partition and node selection method for reactive power/voltage control based on community detection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 32-37.
- [4] 卢锦玲, 朱永利. 基于暂态能量裕度的电力系统脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 96-103.
ZHU Jinling, ZHU Yongli. Power system vulnerability assessment based on transient energy margin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 96-103.
- [5] 赵渊, 吴小平, 谢开贵. 基于频率动态特性的电力系统频率失稳概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 212-220.
ZHAO Yuan, WU Xiaoping, XIE Kaigui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system

- based on frequency dynamic characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.
- [6] 许丹,唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.
- [7] 赵渊,周念成,谢开贵,等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 25-30.
ZHAO Yuan, ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, et al. Sensitivity analysis on reliability assessment of bulk power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 25-30.
- [8] 廖旋焕,胡智宏,马莹莹,等. 电力系统短期负荷预测方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 147-152.
LIAO Nihuan, HU Zhihong, MA Yingying, et al. Review of the short-term load forecasting methods of electric power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 39(1): 147-152.
- [9] 谢会玲,鞠平,罗建裕,等. 基于灵敏度计算的电力系统参数可辨识性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 17-21.
XIE Huiling, JU Ping, LUO Jianyu, et al. Identifiability analysis of load parameters based on sensitivity calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 17-21.
- [10] 刘水平,刘明波,谢敏. 基于轨迹灵敏度的电力系统模型预测切负荷控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 28-35.
LIU Shuiping, LIU Mingbo, XIE Min. Model predictive control method for load shedding of power systems based on trajectory sensitivities[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 28-35.
- [11] 袁骏,段献忠,何仰赞,等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7-10.
YUAN Jun, DUAN Xianzhong, HE Yangzan, et al. Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability in power systems[J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 7-10.
- [12] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(上下册) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [13] 邵玉槐,李肖伟,程晋生. REI等值法用于多节点配电系统短路电流计算的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 64-68.
SHAO Yuhuai, LI Xiaowei, CHENG Jinsheng. Studies on applying REI method to computing short-circuit fault current of distribution system of many nodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 64-68.
- [14] 李智,杨洪耕. REI等值和变距线性回归在地区电网电压无功优化控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 18-22, 42.
LI Zhi, YANG Honggeng. Application of REI equivalent and varying-intercept linear regression in voltage and reactive power optimization control in regional power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 18-22, 42.
- [15] OATTS M L, ERWIN S R, HART J L. Application of the REI equivalent for operations planning analysis of interchange schedules[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(2): 547-555.
- [16] 刘志文,刘明波,林舜江. REI等值技术在多区域无功优化计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 191-200.
LIU Zhiwen, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Research on application of REI equivalent technique into multi-area reactive power optimization computing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 191-200.
- [17] 杨白洁,袁铁江,晁勤,等. 地区电网动态等值模型和等值方法改进[J]. 电网与节能能源, 2012, 28(5): 29-34.
YANG Baijie, YUAN Tiejing, CHAO Qin, et al. Local grid dynamic equivalent model and improvement of equivalent model[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(5): 29-34.
- [18] 马进,王景钢,贺仁睦. 电力系统动态仿真的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 20-26.
MA Jin, WANG Jinggang, HE Renmu. Sensitivity analysis of power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 20-26.
- [19] 刘庆,张东英,刘燕华,等. BPA电网模型自动导入DIGSILENT的研究和开发[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 112-117.
LIU Qing, ZHANG Dongying, LIU Yanhua, et al. Research and development of BPA grid model imported to DIGSILENT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 112-117.

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2014-11-11

作者简介:

武艳(1979-),女,硕士研究生,讲师,研究方向为电力系统稳定运行控制与分析; E-mail: 312334301@qq.com
杨数强(1982-),男,硕士研究生,讲师,研究方向为自动控制系统;
蒋志勋(1984-),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统稳定运行控制与分析。

(编辑 周金梅)