

辽宁电网 220 kV 系统自动电压控制关键技术研究

孙辉¹, 刘松楠¹, 周玮¹, 胡姝博¹, 李铁², 李大路², 张艳军²

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 辽宁省电力有限公司调通部调度处, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 在辽宁电网自动电压控制系统升级的控制策略研究中, 对于辽宁电网软分区方法、中枢节点以及主导节点的选择等问题结合电网实际情况进行改进。针对分区过程中出现的需要认为确定分区个数、存在孤立节点单独作为分区以及分区后个别节点分区结果不合理等问题, 提出了基于条件聚类的预分-校正软分区方法。而对于区域中对于电压变化敏感的临界节点, 将其与可控主导节点共同作为各区域重点监视与调控的监视节点, 并给出其控制原则。通过辽宁电网 220 kV 系统对上述方法的应用验证, 效果良好, 满足工作要求。

关键词: 自动电压控制; 分区; 中枢节点; 可控主导节点; 临界节点

Key technologies research on automatic voltage control in Liaoning power grid 220 kV system

SUN Hui¹, LIU Song-nan¹, ZHOU Wei¹, HU Shu-bo¹, LI Tie², LI Da-lu², ZHANG Yan-jun²

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Dispatching Department, Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: In the research of control strategy of upgrading Liaoning power grid automatic voltage control system, taking the power grid reality into consideration, this paper improves the method of partitioning and the principle of choosing the key node and controllable pilot node. To solve the problems such as: one needs to artificially determine the number of partitions, it is possible that isolated node be as a whole partition, and there are still few unreasonable nodes in partition results, a pre-partition-correction method based on conditional clustering analysis is proposed. The voltage-sensitive critical node, together with controllable pilot node, be as monitoring nodes which are mainly monitored and regulated in each partition. And this paper also proposes the control principle of the critical node. After testing the method by applying it in the 220 kV system of Liaoning power grid, a desired result which meets the work requirements is got.

Key words: automatic voltage control; partitioning; key node; controllable pilot node; critical node

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0043-06

0 引言

无功电压控制技术对于电力系统的安全性和经济性的提高起到了重要作用, 得到研究人员和运行人员的关注。近年来, 在法国 EDF 提出分级电压控制方案的基础上^[1-2], 国内一些区域电网在实现自动电压控制策略时, 采用基于“软分区”的三层/两层电压控制模式, 取得了较好的控制效果^[3-4]。

在分级电压控制技术中, 首先依据系统无功潮流特性, 将电网划分为彼此解耦的控制区域, 这是实现分区闭环控制的基础, 要求各子分区的规模适

当, 且具备充足的无功电压控制的能力。其次是选择合理的技术指标, 在每个区域选择一组无功源控制节点作为中枢节点, 以及一组适当的电压具有代表性的被控节点作为可控主导节点, 满足中枢节点对于子区域的电压控制具有足够的灵敏度, 可控主导节点具有代表性及可控性。最后监测可控主导节点电压变化, 依据全局无功优化的结果, 适当修正中枢节点的电压设定值, 通过自动控制其无功出力, 达到控制该区域电压的目的^[5-17]。

将电网在无功电压层面上划分成彼此联系较小、解耦松散的区域是实现分级电压控制的关键。因此, 研究人员提出了多种分区方法, 如基于无功源控制空间的聚类分析方法^[5,13,18], 利用雅克比矩阵特征结构规律进行分区的方法^[19], α 嵌套分解法^[10]等。其中, 基于无功源控制空间聚类分析的方法可

基金项目: 辽宁省博士启动基金计划(20121023); 辽宁省电力有限公司 2012 年科技项目(2012YF-7); 国家海洋局海洋可再生能源专项资金项目(GHME2011CL01)

以将电网进行有效的分区,并在一些区域电网中实现了应用,得到了较为理想的结果^[4-5,13]。

为了实现区域内电压闭环控制,中枢节点和可控主导节点的恰当选择是重要的技术环节。通常在分区结果的基础上,根据中枢节点的特点,利用电气距离的概念对其进行选择^[6,8];根据可控主导节点代表性及可控性的要求,利用节点间无功电压灵敏度关系对其进行选择^[9-11]。

本文在完成辽宁电网自动电压控制系统升级的控制策略研究中,对于辽宁电网软分区方法、中枢点以及主导节点的选择等问题结合电网实际情况进行改进。提出了基于条件聚类的预分-校正软分区方法;并且,将临界节点与可控主导节点共同作为各区域重点监视与调控的监视节点,并给出其控制原则。通过辽宁电网 220 kV 系统对上述方法的应用验证,效果良好,满足工作要求。

1 基于条件聚类的预分-校正软分区方法

1.1 无功源控制空间

由潮流计算及有功与无功的弱耦合联系,可得

$$\Delta Q = L \cdot \Delta V \quad (1)$$

在正常运行方式下, L 可逆,于是可得到

$$\Delta V = S_{QV} \cdot \Delta Q \quad (2)$$

式中, $S_{QV} = L^{-1}$, 该阵是关于无功注入变化对电压变化的灵敏度矩阵,该矩阵反映系统中各节点的无功、电压间联系的紧密程度, S_{ij} 为其第 i 行第 j 列元素。在此基础上,定义系统中任意两节点间的等效电气距离为

$$\alpha_{ij} = \frac{\left| \frac{\Delta V_i}{\Delta Q_j} \right|}{\left| \frac{\Delta V_j}{\Delta Q_j} \right|} = \frac{\left| \frac{\Delta V_i}{\Delta V_j} \right|}{\left| \frac{\Delta Q_j}{\Delta Q_j} \right|} \approx \left| S_{ij} \right| / \left| S_{jj} \right|$$

$$d_{ij} = -\lg(\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji}) \quad (3)$$

式中, d_{ij} 为节点 i, j 之间的等效电气距离,反映了节点 i, j 之间的无功、电压的紧密程度,且恒大于零。该距离是系统分区的基础,为无功源控制空间的建立提供了理论依据。

设系统中存在 g 个无功源控制节点,构成集合 Δ_{PV} ; 存在 l 个被控节点,构成集合 Δ_{PQ} 。将每个无功源控制节点的无功控制能力作为空间的一维,这样就构成了一个 g 维的无功源控制空间。

在这个空间中,对于被控节点 i 在维度 j 上的坐标用 x_{ij} 表示,利用等效电气距离的概念,定义

$$x_{ij} = d_{ij} \quad (4)$$

式中: $i \in \Delta_{PQ}$; $j \in \Delta_{PV}$ 。这样就可以用一组 g 维的向量 $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ig})$ 作为节点 i 在空间中的坐标。该坐标

向量表示了被控节点与各个无功源控制节点之间无功、电压的紧密程度。对于任意两个被控节点 m 和 n ,应用欧几里得公式可直接求出两点之间的距离为

$$D_{mn} = \sqrt{(x_{m1} - x_{n1})^2 + \dots + (x_{mg} - x_{ng})^2} \quad (5)$$

显然,该距离反映了各个被控节点之间,对于无功源变化的响应趋势的相似程度,从概念上满足了聚类分析的理论要求。

1.2 基于条件聚类的预分区方法

由于辽宁输电网已完成电磁环网的解环,根据无功电压控制分层分区的原则,将 500 kV 系统和 220 kV 系统在无功层面上进行分层。分层后,根据各节点之间的连通关系,220 kV 系统可以分成三个彼此互不相干的子系统,如图 1 所示。

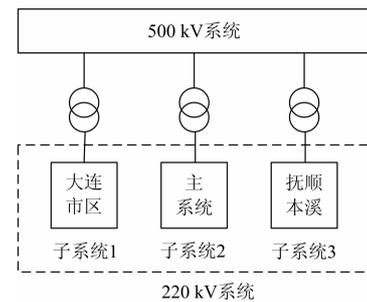


图 1 辽宁电网 220 kV 子系统示意图

Fig. 1 Subsystem result of 220 kV system in Liaoning power grid

对于 3 个子系统需要进一步进行区域划分。以子系统 2 为例,在冬大运行模式下,整个子系统共有 233 个节点,其中无功源控制节点 39 个,被控节点 194 个。

为了解决原有聚类方法应用到辽宁电网 220 kV 系统中,出现的不能确定子分区个数以及分区后会出现孤立节点单独作为分区的问题,本文提出了基于条件聚类的预分区方法。其基本思想是:分区前,根据实际要求设定分区后各子分区必须满足的边界条件。分区时,每次找到不满足要求的子分区,进行区域划分。直到所有分区均满足要求,分区结束。

子分区的边界条件可根据实际要求来设定。目前,对于辽宁电网 220 kV 系统分区时,根据实际情况与现场工作人员讨论后,设定条件如下。

(1) 子分区必须具备具有无功调节能力的无功源控制节点;

(2) 子分区中节点数不少于 10 个。

综合以上方法,可以得到辽宁 220 kV 系统分区的具体流程。

步骤 1: 根据实际要求设定分区后所有子分区必须满足的边界条件。

步骤 2: 系统被控节点集合为 Δ_{PQ} , 节点总数为 l 。初始时将每一个节点作为一个子分区 Ω_i , ($i=1,2,3,\dots,l$), 系统分区数 $N_{\text{group}}=l$, 将各被控节点在无功源控制空间中的距离 D_{ij} 作为相应子分区 Ω_i 、 Ω_j 之间的距离。

步骤 3: 根据最小连通性原则^[12], 将各个无功源控制节点与其等效电气距离 d_{ij} 最小的被控节点合并, 作为一个子分区。

步骤 4: 找到所有不满足设定要求的子分区 Ω_m ($m \leq N_{\text{group}}$), 得到与每个不满足要求的子分区距离最小的子分区 Ω_n ($n \leq N_{\text{group}}$) 以及最小距离 D_{mn} 。

步骤 5: 找到所有 D_{mn} 中最小的一个, 将 Ω_m 与 Ω_n 合并为一个新的子分区记为 Ω_p , 重新计算新的子分区 Ω_p 与除 Ω_m 和 Ω_n 以外的其他所有子分区 Ω_q ($q \leq N_{\text{group}}, q \neq m, q \neq n$) 的距离: $D_{pq} = \min(D_{mp}, D_{mq})$, 去掉子分区 Ω_m 与 Ω_n , $N_{\text{group}} = N_{\text{group}} - 1$ 。

步骤 6: 判断是否存在不满足设定要求的子分区, 若不存在, 分区结束, 若存在, 返回步骤 4。

按照上述方法进行分区, 可以得到相对较合理的分区结果, 便于进行无功电压控制。而且可以根据实际电网的要求适当地调整子分区边界条件, 保证分区的合理性。

1.3 分区结果校正

利用上述方法得到的分区结果, 整体上已经基本满足了分区要求, 但仍存在个别节点所在子分区并不合理, 因此需要对分区结果进行校正, 具体方法如下。

步骤 1: 将分区结果中各子分区的无功源控制节点保留, 而将所有被控节点全部去除, 形成新的子分区 Ω_i , ($i=1,2,3,\dots,l$)。

步骤 2: 对于被控节点 i , 找到所有无功源控制节点中, 与其电气距离 d_{ij} 最小的节点 j ($i \in \Delta_{PQ}, j \in \Delta_{PV}$)。

步骤 3: 找到节点 j 所在的子分区 Ω_m , 将节点 i 划分到分区 Ω_m 中。

步骤 4: 重复步骤 2、3, 直到所有被控节点全部重新划分到各子分区中停止。

2 各分区中枢节点的选择

在 220 kV 系统中, 各子区域中枢节点电压不仅要反映其所在子区域内所有节点的电压水平, 而且还要易于进行电压调控, 因此, 其选择依据如下:

1) 电压中枢节点应具有一定的调压手段, 即一定为无功源控制节点;

2) 电压中枢节点应对全区域节点的电压具有足够的灵敏度。

考虑到等效电气距离在一定程度上反映了系统中各节点电压之间的变化关系, 对于任意区域, 设其无功控制节点集合为 Ω_{QV} , 被控节点集合为 Ω_{PQ} , 对于所有 $i \in \Omega_{QV}$, 可以得到

$$Dsum_i = \sum_{j \in \Omega_{PQ}} d_{ij} \quad (6)$$

式中, $Dsum_i$ 就是该区域中第 i 号无功控制节点关于所有被控节点的等效电气距离之和。根据现场人员给出的原则, 按照先发电机无功出力, 后无功补偿装置的原则将 $Dsum$ 由小到大进行排序。选择中枢节点时, 按照排序由前到后选择一个或几个节点作为该子分区的中枢节点。

3 各分区监视节点的选择

3.1 各分区可控主导节点的选择

各分区的可控主导节点是可以反映该分区所有节点的电压水平的被控节点, 即具有代表性; 同时还要易于进行调控, 即具有可控性。

等效电气距离 d_{ij} 反映了节点 i 、 j 之间的无功、电压的紧密程度。因此可以用式 (7) 作为表征各被控节点代表性的指标, 其 R_{i1} 的值越小表明该点的代表性越好, 式中 Ω_{all} 为各子分区全体节点集合。

$$R_{i1} = \sum_{j \in \Omega_{\text{all}}} d_{ij} \quad (7)$$

另外, 由于各个节点的代表性直接反应为其短路电流的大小。短路电流越大, 其代表性越强。因此, 也可以用各个节点的短路电流作为表征各被控节点代表性的指标, 如式 (8) 所示, 其中, I_{fi} 为 i 节点的短路电流。

$$R_{i2} = I_{fi} \quad (8)$$

利用以上两种方法对于各子分区的被控节点的代表性进行由大到小的排序, 可以发现, 两种方法得到的结果基本一致, 但由第一种方法在等效电气距离的定义上以及第二种方法在短路电流计算方法上存在一定的近似, 所以二者会产生一定的偏差。结合辽宁电网实际情况, 本文认为基于短路电流来判断各被控节点代表性的方法在产生偏差时会更加准确。

灵敏度 S_{ij} 反映了 j 节点注入无功对于 i 节点电压的影响。因此可以用式 (9) 作为表征各被控节点可控性的指标, 式中 Ω_{PV} 为各子分区控制节点集合。

$$C_i = \sum_{j \in \Omega_{PV}} S_{ij} \quad (9)$$

按照优先考虑代表性, 在综合考虑可控性的原

则, 先将各个分区中各节点的 R_{i2} 由大到小进行排序, 截取出各个分区排序靠前的若干节点集合 Ω_{PQ_ahead} , 再通过式 (10) 给出的模型进行最终选择。

$$\max_{i \in \Omega_{PQ_ahead}} (R_i + \beta C_i) \quad (10)$$

式中, β 为权重值, β 取值以及集合 Ω_{PQ_ahead} 选取的节点个数可根据实际代表性与客观性所占的比重人为确定。

3.2 各分区临界节点的选择

临界节点是各子区域中对于电压变化非常敏感的被控节点。在正常运行时, 通过中枢节点的调控保持其电压在临界值之上; 而当其发生故障时, 采用紧急控制, 将其切除。

α_{ij} 表示 j 节点电压变化对于 i 节点的影响。因此可以由式 (11) 作为表征各被控节点电压灵敏的指标。

$$S_i = \sum_{j \in \Omega_{all}} \alpha_{ij} \quad (11)$$

式中, S_i 的值越大表明该点对于电压的变化越灵敏。通过排序可以选择 S_i 最大的一个或几个被控节点作为各子分区的临界节点。

4 辽宁电网 220 kV 系统分区及中枢节点和监视节点选取结果及分析

4.1 分区结果及分析

本文应用 2013 年典型运行方式的断面潮流数据, 针对冬季大负荷、冬季小负荷、夏季大负荷、夏季小负荷四种运行方式下不同断面潮流数据, 进行分区以及中枢节点和监视节点的选择。由于四种运行方式下得到的结果基本相同, 在此仅给出冬季大负荷情况下结果。系统的分区结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 冬季运行方式下分区结果

Table 1 Partition results of winter operation mode

分区编号	所属行政分区	节点总数	控制节点数
1	抚顺	20	6
2	沈阳 铁岭	33	6
3	本溪	20	2
4	鞍山	23	5
5	大连	26	3
6	营口	21	4
7	辽阳 沈阳	25	4
8	丹东	19	3
9	沈阳	13	4
10	大连	21	5
11	朝阳	16	2
12	盘锦 阜新	28	4
13	锦州 葫芦岛	29	4

由分区结果可以看出, 辽宁电网 220 kV 系统的分区结果与辽宁省的行政区划很相似。这是由于地理位置等因素, 各个地级市的用电负荷相对集中, 其网架结构中各节点的联系也就非常紧密, 节点之间的距离较小, 所以很容易的划分到一个区域中。但存在以下两点特例。

(1) 子分区 2 中沈阳与铁岭、子分区 12 中盘锦与阜新、子分区 13 中锦州与葫芦岛的部分节点, 由于彼此之间的联系较为紧密, 使得彼此之间距离较小, 从而合并为一个子分区;

(2) 个别节点如子分区 7 中辽彰武节点、子分区 4 中辽襄平变等由于地理位置与接线关系等因素, 划分到与其所在行政分区不同的子分区。

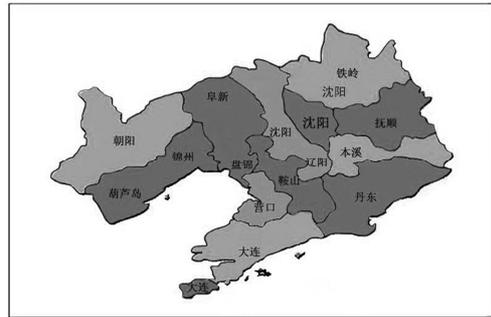


图 2 冬季运行方式下分区结果示意图

Fig. 2 Partition results of winter operation mode

按照此种方法进行分区, 不但可以得到较为理想的分区结果, 便于进行无功电压控制, 而且可以根据实际电网的要求适当地改变子分区合格条件, 保证分区的合理性, 得到了现场工作人员的认可。

4.2 中枢节点和监视节点选择结果

根据式 (7), 系统的各分区中枢节点如表 2 所示。

表 2 各分区中枢节点结果

Table 2 Key node of each partition

分区	节点名
1	辽顺化
2	辽清河
3	辽金哨
4	辽鞍山新厂
5	辽大连热电
6	辽营口厂
7	辽红阳热电厂
8	辽丹东
9	辽沈西热电
10	辽甘井子
11	辽燕山湖
12	辽阜新
13	辽锦州热电

本文根据大量实际运算以及结合现场实际工作人员的经验, 式(11)中取 $\beta=10$, 集合 Ω_{PQ_ahead} 选取排序后各区域前 10% 的节点, 得到了各分区可控主导节点的结果如表 3 所示。

表 3 各分区可控主导节点结果

Table 3 Controllable pilot node of each partition

分区	节点名
1	辽乾武
2	辽虎石台
3	辽卧龙
4	辽宁远
5	辽高城山
6	辽范家
7	辽首山
8	辽丹东变
9	辽宁官
10	辽陆港
11	辽柳城
12	辽青堆子
13	辽薛家

根据式(11), 得到了各分区临界节点的结果如表 4 所示。

表 4 各分区临界节点结果

Table 4 Critical node of each partition

分区	节点名
1	辽永陵
2	辽五爱
3	辽太子
4	辽中心
5	辽长山
6	辽蓝东
7	辽佟二堡
8	辽新兴
9	辽于洪
10	辽大连
11	辽凌源
12	辽煤制气
13	辽华山

结合辽宁电网实际情况与现场运行人员的经验进行分析, 发现得到的可控主导节点与临界节点的结果较为合理, 满足工作要求。

5 结论

本文以无功源控制空间聚类分析方法为理论依

据, 提出了一种基于条件聚类的预分-校正软分区方法。该方法解决了传统分区方法在实际辽宁电网应用中出现的弊端; 并且利用预分-校正的方法, 将分区后个别分区不合理的被控节点进行了重新划分。根据实际情况适当地调整子分区边界条件, 使得该分区方法具有了一定的适应不同电网的能力。

在选择监视节点时, 按照优先考虑被控节点的代表性, 再综合考虑可控性的原则, 得到可控主导节点结果; 再选出各分区对于电压变化最敏感的临界节点。将二者共同作为各个子区域重点监视与调控的目标。

参考文献

- [1] PAUL J P, LEOST J Y, TESSERON J M. Survey of the secondary voltage control in france: present realization and investigations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 505-511.
- [2] SANCHI J L, FERNANDEZ J L, CORTES A, et al. Secondary voltage control: analysis, solutions and simulation results for the spanish transmission system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 630-638.
- [3] 钟毅, 陈蕊. 地区电网 AVC 系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 41-44, 53.
ZHONG Yi, CHEN Rui. Design and realization of AVC system about area power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 41-44, 53.
- [4] 李江, 晁勤, 常喜强, 等. 聚类分区算法在新疆电网的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 57-59, 72.
LI Jiang, CHAO Qin, CHANG Xi-qiang, et al. Clustering area partition method applied to Xinjiang power network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 57-59, 72.
- [5] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Clustering area partition method applied to Xinjiang power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.
- [6] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压 / 无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 221-224.
WANG Yao-yu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. An expert knowledge based sub-area division method for hierarchical and distributed electric power system voltage VAR optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224.
- [7] 程浩忠. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京: 中国

- 电力出版社, 2004: 231-250.
- [8] 徐文超, 郭伟, 李海峰, 等. AVC 应用于江苏电网的初步研究[J]. 继电器, 2003, 31(5): 23-26.
XU Wen-chao, GUO Wei, LI Hai-feng, et al. Preliminary study on automatic voltage control of the electric network in Jiangsu Province[J]. Relay, 2003, 31(5): 23-26.
- [9] 代飞, 黄磊, 徐箭, 等. 基于二级电压控制的河南电网分区和主导节点选择[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 101-105.
DAI Fei, HUANG Lei, XU Jian, et al. Voltage partitioning and pilot nodes selecting of Henan power grid based on secondary voltage control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 101-105.
- [10] 龙启峰, 丁晓群, 刘小波, 等. 基于可控主导节点的电压分区及电压校正研究[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 59-62.
LONG Qi-feng, DING Xiao-qun, LIU Xiao-bo, et al. Study of voltage partition based on controllable pilot nodes and voltage correction[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 59-62.
- [11] 刘小波, 丁晓群, 龙启峰, 等. 基于 Ward 等值的二级电压控制研究[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 53-56, 71.
LIU Xiao-bo, DING Xiao-qun, LONG Qi-feng, et al. Study on secondary voltage control based on ward equivalent[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 53-56, 71.
- [12] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 363-384.
- [13] 赵晋泉, 刘傅成, 邓勇, 等. 基于映射分区的无功电压控制分区算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 36-39, 59.
ZHAO Jin-quan, LIU Fu-cheng, DENG Yong, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on a mapping division algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 36-39, 59.
- [14] 王玲, 林其有, 洪城, 等. 地区电网电压无功联动协调控制系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 65-69, 74.
WANG Ling, LIN Qi-you, HONG Cheng, et al. Study on linkage and coordinated control system for voltage and reactive control in the region electric network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 65-69, 74.
- [15] 张勇军, 李启峰, 张锡填. 大电网省地电压调控的博弈收益函数建模[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 254-300.
ZHANG Yong-jun, LI Qi-feng, ZHANG Xi-tian. Game payoff function modeling for game of provincial and district voltage control in large-scale power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 254-300.
- [16] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.
LI Xin-bin, ZHU Qing-jun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 137-143.
- [17] 武诚, 徐政, 常勇. 高压侧电压控制对电力系统小扰动稳定性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 146-152.
WU Cheng, XU Zheng, CHANG Yong. Effects of high side voltage control on the small signal stability of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 146-152.
- [18] LI Zhong-xu, LIU Yu-tian, LIU Ru-shui, et al. Network partition for distributed reactive power optimization in power system[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, IEEE, Sanya, China, 2008: 385-388.
- [19] 杨朋朋, 韩学山. 雅克比矩阵特征结构规律与二次电压控制的分区[J]. 继电器, 2005, 33(12): 1-5.
YANG Peng-peng, HAN Xue-shan. Jacobian matrix eigen structure variation mode of the load flow and network partition in the secondary voltage control[J]. Relay, 2005, 33(12): 1-5.

收稿日期: 2013-12-29; 修回日期: 2014-02-15

作者简介:

孙 辉(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制;

刘松楠(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电系统自动电压控制; E-mail: 751239351@qq.com

周 玮(1981-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行分析与控制。