

主动配电网分区分布式无功优化控制方法

陈明¹, 顾伟¹, 李鹏², 张雪松², 赵波²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江杭州 310014)

Distributed Reactive Power Optimization Control Method for Active Distribution Network Based on Subarea Division

CHEN Ming¹, GU Wei¹, LI Peng², ZHANG Xuesong², ZHAO Bo²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute of State Grid, Hangzhou 310014, China)

摘要: 大规模分布式电源的接入对配电网无功优化提出了巨大的挑战, 而传统集中优化存在依赖中央控制器, 易产生通信堵塞等弊端。为提高主动配电网无功电压控制的可靠性, 采用二阶锥松弛技术建立了主动配电网无功优化模型, 并基于辅助问题原理提出了一种主动配电网分区分布式无功优化控制方法, 并进一步提出了边界变量标准化处理方法, 以提高分区无功优化的收敛速度, 实现全局网损优化。基于所提优化方法, 各个分区仅需采集区内功率电压信息, 并与相邻分区交互边界变量即可实现无功调度和全局网损优化, 保证系统电压质量。最后, 基于 IEEE 69 节点配电系统进行仿真, 验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 主动配电网; 分布式控制; 辅助问题原理; 无功优化; 分区控制; 二阶锥松弛

Abstract: The integration of large-scale distributed generations presents a huge challenge on reactive power optimization for active distribution network. While the traditional centralized control has such disadvantages as being dependent on central control and easy to produce a communication blockage. To improve the control reliability of distribution network, reactive power optimization model is built based on second-order cone relaxation techniques, and a subarea based distributed reactive power optimization control method for active distribution network based on auxiliary problem principle is presented to achieve global active power loss optimization. In addition, border variable standardized method is proposed to improve convergence speed of subarea based reactive optimization. Based on the proposed control method, the reactive power scheduling and global active power loss optimization can be realized just according to the

power and voltage information collected from individual partition and interface border variables in neighborhood partitions, which guarantees voltage quality of power system. In the end, by using the IEEE 69-bus distribution system, the effectiveness of the proposed control method is verified by numerical simulations.

Keywords: active distribution network; distributed control; auxiliary problem principle; reactive power optimization; subarea based control; second-order conic relaxation

0 引言

随着化石能源的逐渐枯竭和低碳经济的发展, 以风能、太阳能为主的可再生能源发电技术的研究和应用使得配电网中分布式可再生能源发电的渗透率逐渐升高, 从而使得传统配电网的可控性逐渐增加, 但也给配电网的规划、保护、控制带来了诸多问题^[1]。为充分发挥配电网消纳可再生能源的能力, 国际大电网会议首次提出了主动配电网(Active Distribution network, ADN)的概念以更好地实现各种可控或半可控的发电单元以及可控负荷的协调优化调度^[2], 为用户提供清洁可靠的电力能源。

分布式电源无功出力的调节能力使得主动配电网优化系统有功网损和提高电压质量的能力逐渐增强, 但集中控制器需要处理大量的数据通信, 对于通信的可靠性要求较高。并且, 配电侧分布式电源的大规模接入以及储能、电动汽车和柔性负荷的发展将极大地增加集中控制器优化调度的难度。

文献[3]基于邻居通信提出了一种基于多代理系统(MAS)的主动配电网分布式电压控制方法, 解决了电压越限恢复问题。但所提方法基于简化的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477029); 国家电网公司科技项目(5211DS150015)

电压估计方程,未考虑无功分布式优化。配电网潮流方程的复杂性使得基于馈线节点进行分布式优化具有较大的难度,而大电网的分区控制给主动配电网分布式控制提供了一种很好的思路。

文献[4]基于辅助问题原理提出了输电网多分区并行无功优化求解方法,实现了多分区无功分布式并行优化计算。文献[5]针对上述分布式求解方法分析了内点法求解精度对于输电网并行无功优化算法的收敛性影响,并且证明了分区平衡节点的不一致不影响分布式优化。考虑配电网潮流特性,文献[6]采用二阶锥技术实现配电网分区潮流模型的凸化松弛,并基于分布式交替乘法建立主动配电网分布式无功优化控制模型,但待协调边界变量较多,降低了无功优化的收敛速度。

本文基于二阶锥松弛技术建立了主动配电网无功优化模型,并将辅助问题原理和分区控制应用于主动配电网的无功优化,提出了一种主动配电网分区分布式无功优化控制方法,使得各分区仅需通过边界变量的交互迭代即可实现全局网损的优化,避免集中式控制通信故障影响整个主动配电网的无功电压控制。同时,提出了边界变量参数标准化处理方法,以提高边界变量的收敛速度,降低分区分布式无功优化求解的时间。最后的仿真结果表明了所提优化方法和改进收敛方法的有效性。

1 主动配电网无功优化控制模型

在配电网无功电压优化中,有载调压变压器(OLTC)由于日动作次数限制通常在日前调度中进行优化,因此短时无功优化调度不考虑OLTC的控制。本文在电压安全约束下以线路网损作为无功优化的目标,如式(1)所示:

$$f(x) = \sum_{(i,j) \in L_e} r_{ij} l_{ij} \quad (1)$$

式中: L_e 为所有线路的集合; r_{ij} 为线路 ij 的电阻; l_{ij} 为二阶锥松弛后引入的变量,为线路 ij 电流的平方。

① 二阶锥松弛约束

为了应用旋转二阶锥松弛技术实现配电网线路潮流方程的凸化松弛^[7],引入变量 $u_i = V_i^2$ 和 $l_{ij} = I_{ij}^2$ 对线路方程做凸松弛,松弛方式下式所示:

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \Rightarrow l_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{u_i} \quad (2)$$

② 二阶锥松弛后的等式约束:

$$\begin{cases} \sum_{i \in u(j)} (P_{ij} - r_{ij} l_{ij}) = \sum_{k \in v(j)} P_{jk} + (P_{Lj} - P_{Gj}) \\ \sum_{i \in u(j)} (Q_{ij} - x_{ij} l_{ij}) = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk} + (Q_{Lj} - Q_{Gj}) \\ u_j = u_i - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + [r_{ij}^2 + x_{ij}^2] l_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u(j)$ 为以 j 为末端节点的线路首端节点集合; $v(j)$ 为以 j 为首端节点的线路末端节点集合; x_{ij} 为线路 ij 的电抗; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 处负荷的有功功率和无功功率; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别表示节点 i 处发电单元注入的有功功率和无功功率,其表达式如下式所示:

$$\begin{cases} P_{Gi} = P_{DGi} \\ Q_{Gi} = Q_{DGi} + Q_{SVCi} + N_{Ci} Q_{Ci} \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_{Ci} 表示节点 i 处投入的无功电容器组数; Q_{Ci} 表示节点 i 处无功电容器单组容量。

③ 系统安全约束:

$$\begin{cases} V_{\min i}^2 \leq u_i \leq V_{\max i}^2 \\ Q_{\min ij} \leq Q_{ij} \leq Q_{\max ij} \end{cases} \quad (5)$$

④ 无功补偿装置约束:

$$\begin{cases} Q_{\min i} \leq Q_{SVCi} \leq Q_{\max i} \\ N_{Ci} = 0, 1, 2, \dots, N_{C\max i} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $N_{C\max i}$ 为节点 i 处电容器最大投入组数。

⑤ 分布式电源无功出力约束:

$$\begin{cases} Q_{\max i} = \sqrt{S_{DGi}^2 - P_{DGi}^2} \\ -Q_{\max i} \leq Q_{DGi} \leq Q_{\max i} \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_{DGi} 表示节点 i 处 DG 最大视在功率模值。

以式(1)为目标函数,式(2)~(7)为约束即构成了基于二阶锥松弛技术的主动配电网集中式无功优化模型。

2 分区分布式无功优化控制方法

2.1 分区分布式无功优化模型

图1所示为主动配电网两分区分解示意图,两个分区通过“复制”边界节点将一个系统分成两个独立的子分区^[8],并通过边界节点一致性约束维持各个分区间的联系。

在图1中,将分解到两个区的边界节点等效成一个虚拟发电节点, x_{bij} 和 x_{bji} 分别表示分区 i 和分区 j 的边界节点变量,包括有功无功电压电流4个参数,从而主动配电网分区无功优化模型如下所示:

$$\begin{aligned} \min \quad & F(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \\ \text{s. t.} \quad & (x_i, x_{bi}) \in R_i \end{aligned}$$

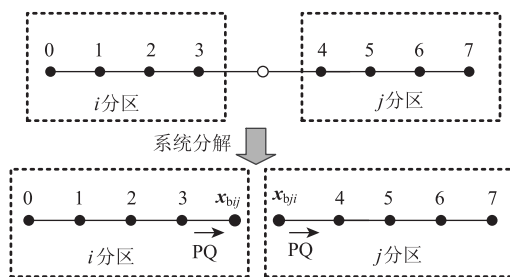


图1 主动配电网分区分解示意图

$$\theta(\mathbf{x}_b) = \mathbf{x}_{b1} - \mathbf{x}_{b2} = \mathbf{0} \quad (8)$$

式中： n 为分区总个数； $\mathbf{R}_i$ 表示分区 i 状态变量和控制变量的可行域； $\mathbf{x}_b$ 为所有边界变量构成的向量； $\mathbf{x}_{b1}$ 和 $\mathbf{x}_{b2}$ 表示所有边界节点复制的两个边界变量分别组成的向量； $\theta(\mathbf{x}_b)$ 为边界变量一致性函数。

针对上式中的边界变量一致性约束，利用增广拉格朗日松弛法，在上述变量的可行域范围内可将上述问题转化为求解下述增广拉格朗日函数的极小值问题：

$$J(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \langle \boldsymbol{\lambda}, \theta(\mathbf{x}_b) \rangle + c/2 \langle \theta(\mathbf{x}_b), \theta(\mathbf{x}_b) \rangle \quad (9)$$

式中： $\boldsymbol{\lambda}$ 为拉格朗日乘子矩阵； c 为惩罚因子； $\langle *, * \rangle$ 表示向量的内积。

上式中增广拉格朗日部分使得各个分区的目标函数互相耦合，为了实现分区独立进行无功优化求解，可以通过辅助问题原理将上述优化目标等价转换为可以按分区进行分解的优化目标，以实现多分区无功分布式协调优化。

2.2 基于辅助问题原理的分布式无功优化方法

辅助问题原理(auxiliary problem principle, APP)算法是通过构造辅助函数将一个鞍点求解问题转化为求解相应的辅助问题^[4,9]。设函数 $J(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 包括可微的函数 $J_1(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 和不可微的函数 $J_2(\mathbf{x})$ ，APP算法是指，若能构造一个辅助问题 $G(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) + \epsilon J_2(\mathbf{x})$ ，并且 $G'(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*) = \epsilon J_1'(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*)$ ，则求解 $J(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 的鞍点问题可等价转化为求解 $G(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) + \epsilon J_2(\mathbf{x})$ 的鞍点问题，其中 $G(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 称为辅助函数。

由于 $J_2(\mathbf{x})$ 更具有普遍性，将式(9)中的 $f(\mathbf{x})$ 设为 $J_2(\mathbf{x})$ ，后两项设为 $J_1(\mathbf{x})$ ，根据APP的原理，构造第 k 次迭代中的辅助函数如下式所示：

$$G^{(k)}(\mathbf{x}) = \Omega(\mathbf{x}) + \langle \epsilon J_1'(\mathbf{x}^{(k)}) - \Omega'(\mathbf{x}^{(k)}), \mathbf{x} \rangle \quad (10)$$

式中： $\epsilon > 0$ ， $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_b, \boldsymbol{\lambda}]$ ， $\Omega(\mathbf{x})$ 为核函数，决定着分布式优化控制的收敛性。

由于二次函数具有较好的收敛性，本文以边界变

量和拉格朗日乘子矩阵构造二次核函数，如下式所示：

$$\Omega(\mathbf{x}_b, \boldsymbol{\lambda}) = \beta/2 \langle \mathbf{x}_b, \mathbf{x}_b \rangle - 1/2 \langle \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda} \rangle \quad (11)$$

将式(9)、式(11)代入式(10)即可得第 k 次迭代中辅助函数的表达式，取 $\epsilon = 1$ ，可得第 k 次迭代中主动配电网分区分布无功优化模型如下式所示：

$$(\mathbf{x}_i^{(k+1)}, \mathbf{x}_{bi}^{(k+1)}) = \arg \min \{ f_i(\mathbf{x}_i) + \frac{\beta}{2} \|\mathbf{x}_{bi} - \mathbf{x}_{bi}^{(k)}\|^2 +$$

$$\sum_{j \in r(i)} [\lambda^{(k)}_{ij} + c(\mathbf{x}_{bij}^{(k)} - \mathbf{x}_{bji}^{(k)})] \xi_{ij} \mathbf{x}_{bij} \quad (12)$$

$$\lambda_{ij}^{(k+1)} = \lambda_{ij}^{(k)} + \rho [\mathbf{x}_{bij}^{(k)} - \mathbf{x}_{bji}^{(k)}] \quad (13)$$

式中： $\mathbf{x}_{bi}$ 为 i 分区所有边界变量构成的向量； $r(i)$ 表示 i 分区的邻居分区集合； ρ 为边界变量交互系数； ξ_{ij} 为常系数，在 $i > j$ 时为-1，否则为1；

各个分区根据式(12)进行无功优化，并与邻居通信边界变量实现分区间的无功协调。综合考虑相邻分区边界变量的横向迭代误差以及边界变量前后次迭代的纵向迭代误差，设边界变量的收敛偏差如下式所示：

$$\delta_{ij}^{(k)} = \max \{ H_{ij}^{(k)}, V_{ij}^{(k)}, V_{ji}^{(k)} \} \quad (14)$$

式中： $H_{ij}^{(k)}$ 表示第 k 次迭代中，边界变量 $\mathbf{x}_{bij}$ 和 $\mathbf{x}_{bji}$ 之间的横向收敛偏差，p. u.； $V_{ij}^{(k)}$ 和 $V_{ji}^{(k)}$ 分别表示第 k 次迭代中边界变量 $\mathbf{x}_{bij}$ 和 $\mathbf{x}_{bji}$ 的迭代值与第 $k-1$ 次迭代值之间的纵向收敛偏差，p. u.。

2.3 分布式无功优化收敛性改进方法

在无功优化迭代过程中，边界节点所包含的4个电气参数可能相差几个数量级，延缓了边界节点的收敛速度，因此本文提出一种边界变量的标准化处理方法，实现一个边界变量不同电气参数间的协同迭代，标准化处理如下式所示：

$$\mathbf{x}'_{bij} = \mathbf{x}_{bij} \oslash \mathbf{x}_{sij}^* \quad (15)$$

式中： $\mathbf{x}'_{bij}$ 为标准化处理后的边界变量； $\mathbf{x}_{sij}$ 为标准化处理向量； $\mathbf{x}_{bij}^*$ 表示无功优化后的边界变量值； $\oslash$ 表示两个向量对应项相除。

上式中标准化处理相当于同时更新分布式无功优化模型中的 β 、 ρ 、 λ 3个系数，仅改变优化的收敛速度，不影响问题的收敛结果^[10]。由于迭代中边界变量精确优化值待求解，采用相邻两个分区第 k 次优化所得的边界变量平均值进行估计。同时，为了防止过小的电气参数对收敛性的影响，需限制各个参数间最大比例，本文取最大比例为1 000。

3 仿真与分析

为验证所提无功控制方法以及收敛性改进方法

的有效性, 针对 IEEE69 节点配电系统^[11], 基于 MATLAB-YALMIP 平台开发分布式优化控制程序。设 69 节点系统中存在 10 个光伏发电单元, 分别位于节点 {3, 8, 19, 27, 31, 38, 42, 48, 54, 66} 处, 每个 DG 的有功功率输出均为 300kW, 相应逆变器视在功率模值为 400kVA。节点 61 处配置 3 组电容器, 每组电容器的容量为 100kvar。节点 12 处配置一台 SVC, 容量为 300kvar。选取实验参数 $\rho=c=0.65$, $\beta=1.3$ 。

3.1 所提分布式控制方法验证

针对 69 节点 4 分区方式, 采用本文所提出的分区分布式优化控制方法, 按照有无边界变量标准化处理进行仿真, 所得结果如图 2 所示。

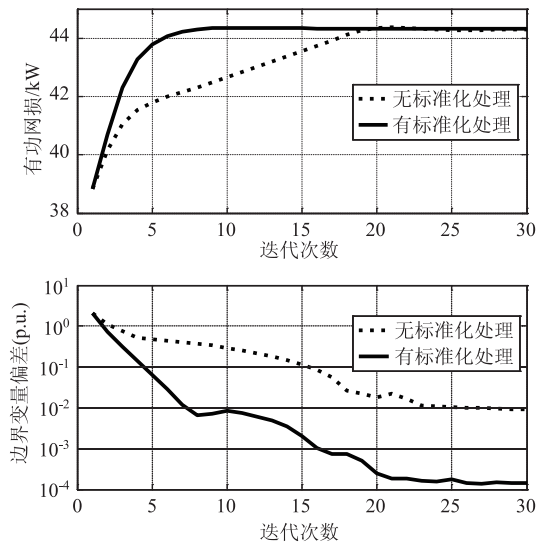


图 2 分区分布式无功优化控制方法验证

由图 2 可见, 基于标准化处理方法, 经过 17 次迭代, 边界变量偏差已经小于 0.001, 网损收敛至最优值 44.32kW, 与集中式优化的偏差仅为 0.04%, 说明所提分区分布式无功优化方法可以有效实现全局网损分布式优化。分区分布式优化过程中无功输出的变化以及优化后各节点的电压如图 3 所示。可见, 基于所提方法无功出力很快达到最终的优化值, 电压也均处在允许的范围内。

当无标准化处理时, 边界变量的精度仅能达到 0.01p. u., 这是因为 1 分区与 4 分区边界变量中的电流平方与电压平方相差 3 个数量级, 前者的精度在 0.01p. u. 左右缓慢收敛, 延缓了整个边界节点的收敛, 对比说明所提标准化处理方法可以提高全局分布式优化控制的收敛速度。

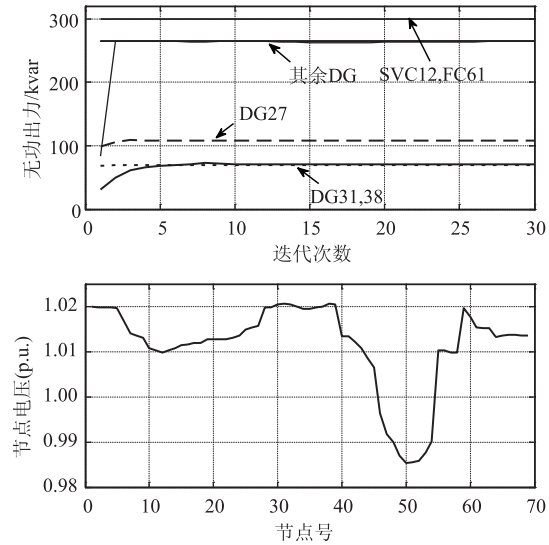


图 3 无功出力优化结果与电压分布

3.2 与文献 [10] 所提方法的比较

针对 69 节点配电系统的不同分区方式, 以 0.001 的收敛精度仿真分析本文所提出的方法与文献 [10] 所提方法的收敛效果, 结果如下表所示 (集中式优化网损为 44.30kW)。

表 1 与文献 [10] 所提方法的收敛性比较				
分区方式	4-1	4-2	5	7
收敛次数	本文 17	21	35	51
	文献 26	34	51	—
网损/kW	本文 44.32	44.58	44.73	44.58
	文献 44.50	44.34	45.02	—
偏差/%	本文 0.04	0.63	0.97	0.63
	文献 0.45	0.08	1.62	—

注: “—” 表示超过 100 次仍未收敛。

从表中数据可见, 基于本文所提出的分布式无功优化控制方法和边界变量标准化处理方法, 无功优化所需的迭代次数相对更少, 网损精度也相对更优。而且, 随着分区数的增加, 本文所提出的方法在收敛速度上更具优势。

3.3 分区方式对收敛性的影响

图 4 所示为 69 节点不同分区方式下边界变量收敛曲线。由表 1 以及图 4 可见, 基于本文所提方法, 4 分区的两种分区方式收敛性差别较小, 并且相对于 5 分区和 7 分区来说, 收敛次数明显较少, 这是因为 4 分区方式下 3 个分区均与主站区直接相连, 分区间耦合较少。

但当分区数增加时, 尤其是相互“串联”的分

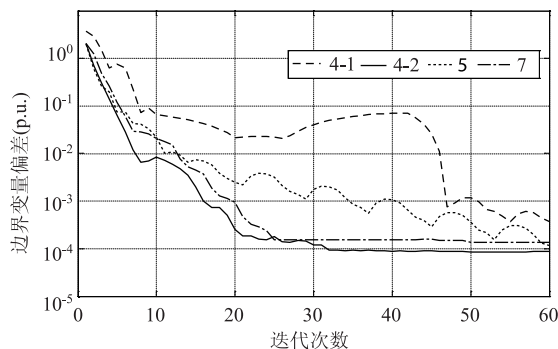


图4 不同分区方式的收敛性比较

区较多时,分区收敛次数明显增加。对7分区来说,末游分区与主站区间隔2个分区,分区间的耦合使得边界变量间的协调较慢,边界变量偏差甚至有所增加。但从全局网损优化结果来看,分区数的增加并没有明显影响网损收敛的精度,均在误差允许的范围内,说明所提分布式无功优化控制方法可以适应不同的分区方式,有效实现全局网损优化。

具体分区方式需综合考虑配电网的拓扑结构、网络规模、负荷等的地理分布、通信成本以及所选分区方式对收敛性的影响,确定分区的个数及各分区节点的个数。在实际分区中,应尽量降低“串联”分区的个数,同时使得每个分区均匀分布一定的负荷、分布式电源及无功补偿装置,既提高分区优化的速度,也为各个分区功率自治提供可能。

4 结束语

本文基于辅助问题原理提出了一种主动配电网分区分布式无功优化控制方法,并进一步提出了边界变量的标准化处理方法,加快分布式无功优化的收敛速度。根据所提控制方法,各个分区仅需与相邻分区交互边界变量即可实现多分区无功协调优化调度,保证全局网损优化。所提方法基于区内集中式、区间分布式的通信方式,既降低一个集中控制器的通信压力和优化模型的复杂度,又提高了主动配电网控制的鲁棒性和可靠性,而且有利于保护区域信息隐私,符合电力市场的发展方向,具有很好的应用前景。但当“串联”分区数较多时,如何更有效地提高分区分布式优化的收敛速度是后续有待进一步研究的内容。

参 考 文 献

[1] 陈旭,张勇军,黄向敏. 主动配电网背景下无功电压

控制方法综述 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.

- [2] Celli G, Ghiani E, Mocci S, et al. From passive to active distribution networks: method and models for planning network transition and development [C] // 42nd International Conference on Large High Voltage Electric Systems 2008, CIGRE 2009, Paris, France, 2008.
- [3] 王笑雪,徐弢,王成山,等. 基于MAS的主动配电网分布式电压控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, (11): 2918-2926.
- [4] 刘宝英,杨仁刚. 采用辅助问题原理的多分区并行无功优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 47-51.
- [5] 颜伟,温力力,余娟,等. 基于辅助问题原理的改进分布式无功优化方法 [J]. 中国电力, 2008, (3): 1-6.
- [6] Zheng Weiye, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. A Fully Distributed Reactive Power Optimization and Control Method for Active Distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016: 1.
- [7] Farivar M, Low S H. Branch Flow Model: Relaxations and Convexification (Parts I, II) [C] // Decision and Control. IEEE, 2012: 3672-3679.
- [8] 汪超群,韦化,吴思缘,等. 七种最优潮流分解协调算法的性能比较 [J]. 电力系统自动化, 2016(6): 49-57.
- [9] Cohen G. Optimization by Decomposition and Coordination: A Unified Approach [J]. Automation of Electric Power Systems, 1978, 23(2): 222-232.
- [10] Hur D, Park J K, Kim B H. Evaluation of convergence rate in the auxiliary problem principle for distributed optimal power flow [J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 525-532.
- [11] 王守相,王成山. 现代配电系统分析 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 248-252.

收稿日期: 2016-08-08

作者简介:

陈明(1991—),男,硕士研究生,研究方向为主动配电网无功电压控制, E-mail: chenming_36@163.com;

顾伟(1981—),男,通信作者,教授,博士生导师,研究方向为主动配电网优化控制等, E-mail: wgu@seu.edu.cn.

(责任编辑: 杨秋霞)