

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191273

# 无功补偿设备和分布式电源协同的配电网优化控制策略研究

乐健, 周谦, 王曹, 赵联港

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 集中式控制模式因可靠性低、通信计算压力大、可扩展性差而不能适应高渗透率分布式电源接入的配电网控制的需求。考虑配电网中接入的无功补偿设备, 基于分布式协同控制思想, 利用分布式电源分组和无功补偿设备分组实现配电网多目标分布式优化控制。针对节点电压控制, 设计了以分布式电源容量利用比为一致性变量的电压控制组分布式控制算法。根据配电网与外部电网交换功率差额的信息, 设计了以无功补偿设备容量利用比为一致性变量的无功控制组分布式控制算法。对于有功功率控制, 设计了分别以容量利用比和功率因数为一致性变量的有功控制组分布式控制算法。给出了各控制组分布式控制算法参数的整定方法, 并进行了两种有功功率控制方法的比较。通过14节点配电网系统的仿真算例验证了该方法的正确性和有效性。

**关键词:** 分布式电源; 分布式优化控制; 容量利用比; 功率因数; 无功补偿设备

## Research on distributed optimal control strategy for a distribution network based on the cooperation of DGs and Var compensators

LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, ZHAO Liangang

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A centralized control mode is hopeless in satisfying the control requirement of a distribution network integrated with high penetration level of Distributed Generations (DGs), because of its low reliability, high computation and communication burden, and poor scalability. In considering the Var Compensators (VCs), this paper develops a multiple-object distributed control strategy for distribution networks utilizing the grouping of DGs and VCs based on the principle of distributed cooperative control. For the task of node voltage control, it develops a distributed control strategy that takes the capacity utilization ratio as the consensus variable for voltage control groups. Given the information on the imbalance of the power exchanged between the distribution network and the external power grid, it formulates a distributed control strategy that also takes capacity utilization ratio of VC as the consensus variable for reactive power control groups. As for the active power control, it proposes two control strategies that respectively take capacity utilization ratio and power factor as the consensus variables. A parameter tuning method for the three kinds of distributed control algorithms and the comparison of the two active power control strategies are presented. Simulation results on the IEEE14 nodes system are given to show the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877154).

**Key words:** distributed generation; distributed optimization control; capacity utilization ratios; power factor; var compensator

## 0 引言

为了应对日益严重的能源危机和环境问题, 电力工业的重心正逐渐由集中式的化石能源发电向分布式新能源发电转移<sup>[1-3]</sup>。传统配电网控制模式主要

为集中式和分散式。集中式控制需由中心控制器收集全局信息并进行计算, 当受控对象数量增多时实现成本较高, 且难以满足实时控制和分布式电源“即插即用”的需求<sup>[4]</sup>; 分散式控制包括可再生能源MPPT控制、下垂控制等, 其仅利用局部测量信息, 控制器之间以及控制器与控制中心之间无需通信链路, 提高了系统可靠性。但该模式利用的信息极为

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51877154)

有限而控制性能较差, 一般不能实现配网运行整体的优化。这两种控制模式均不能适应未来配电网的发展<sup>[5-6]</sup>。

分布式控制系统借助局部通信网络交换信息, 具有更好的控制鲁棒性、通信灵活性以及系统可扩展性<sup>[7]</sup>, 常用的分布式控制算法包括任务分解法和一致性收敛算法<sup>[8-9]</sup>。一致性算法中的各参与对象通过局部通信网络获取自身以及邻近对象的状态信息来控制自身状态的更新, 使得各对象状态最终收敛至一致, 应用一致性算法的分布式控制也被称为分布式协同控制<sup>[10]</sup>。

分布式协同控制已在多个工程领域得到了大量研究和应用, 包括多智能体的编队控制问题<sup>[11]</sup>、趋同控制问题<sup>[8]</sup>、无人机编队以及机器人协同控制<sup>[12-13]</sup>等。近年来, 分布式协同控制在配电网经济调度(ED)<sup>[14]</sup>、微电网频率调控、虚拟发电厂(VPP)控制<sup>[15]</sup>等领域也得到了应用, 但在配电网功率和电压优化控制方面的研究较少。文献[16]提出了分散合作式的微电网电压控制框架, 设计了孤岛模式下通过DG合作维持微网电压和频率稳定的措施。文献[17]提出了分组合作的分布式优化方法, 以调节无功出力控制节点电压的方式实现微网中DG出力的最优调度。但该方法要求领导者节点在传递一致性变量的同时传递一致性变量变化率的参考值信息, 不符合一致性协议的要求。文献[18]在本地控制中增加储能系统以扩大变速风力的出力调节范围, 并设计了以有功出力利用率为一致性变量的大型风电场二级分布式控制策略。文献[19]提出一种阻性虚拟阻抗加补偿虚拟阻抗的改进下垂控制策略, 通过阻性虚拟阻抗实现直流微电网稳态时的功率分配, 而利用补偿虚拟阻抗提升母线电压动态性能。文献[20]针对等效线路阻抗不匹配的情况, 提出了一种基于线路参数辨识的改进下垂控制来消除无功功率分配的偏差。以上配电网电压控制方法仍属本地分散式控制, 在整体优化时控制效果欠佳。越来越多的动态无功补偿装置例如SVG、SVC等被用于控制配电网无功潮流和电压。文献[21]针对传统PI控制需人工整定参数的不足, 设计了适用于配电网SVG的电压模糊控制系统。文献[22]考虑双馈风力发电机的无功输出特性, 分析了SVG在实现其电压无功控制时的作用, 并研究了SVG并网时的控制模型、容量选取以及主要参数的确定。文献[23]提出了应用SVG进行配电网节点电压不平衡治理的综合补偿策略。但目前缺少对于多个无功补偿装置以及无功

补偿装置与分布式电源的协同控制的研究。

本文基于分布式电源和无功补偿装置分组合作的思想, 采用一致性协议设计了具有不同控制目标的分组的分布式优化控制策略, 以实现完全分布式的配电网多目标优化控制。给出了基于分布式电源和无功补偿装置分组的分布式协调控制框架, 对节点电压和无功功率控制, 设计了以容量利用比为一致性变量的分布式优化算法; 而对有功功率控制, 分别设计了以容量利用比和功率因数为一致性变量的分布式控制策略。给出了各分布式控制策略参数的整定方法。通过在14节点系统中的算例验证了本文方法的正确性和有效性。

## 1 分布式协同控制架构

如图1所示含多个分布式电源和无功补偿装置的配电网, 本文考虑的优化控制目标是控制其中多个节点电压为设定值, 同时将配电网与外部电网交换的有功和无功功率控制为给定值。为此, 本文将散布在配电网各个节点的无功补偿装置构成一个无功功率控制分组, 将被控节点附近的几个DG组合成节点电压控制分组, 用于控制某个节点电压, 将多个DG组合形成有功功率控制分组。在图1中这些分组用虚线框包围, 各个分组内部分布式电源或无功补偿装置之间通过双向通信链路(如图1中带箭头红色虚线)交换必要的信息, 以分布式控制方式通过协调配合实现各自分组特定的优化控制目标, 而各分组之间无需通信。

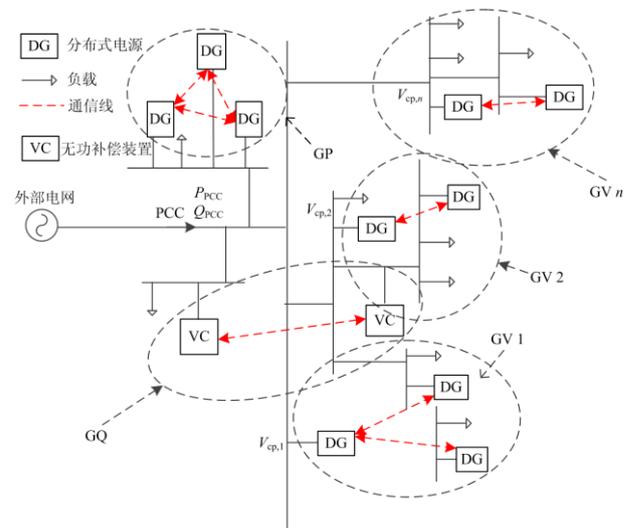


图1 含DG和VC分组的配电网结构

Fig. 1 Structure of a distribution network based on DG and VC grouping

### 1.1 节点电压控制

分布式能源的接入使得配电网潮流流向不定,从而导致配电线路特别容易因功率的变化而产生电压偏差,因此电压管理在配电网研究中具有突出的地位。在分布式模式下,通常将系统划分为若干个子区域,再通过对这些子区域进行电压控制来实现系统电压分布在允许范围内。本文采用文献[17]的电压控制目标,将配网若干节点电压调整为额定值 1 p.u.。该目标由这些节点附近的一个由 DG 构成的分组通过分布式协同控制策略完成。这些分组被称为电压控制分组,如图 1 中的‘GV1’—‘GVn’。考虑到不同电压等级配电网线路的电阻/电抗比有所不同,本文采用同时调节 DG 有功和无功出力进行节点电压控制的方式。此外为在实现节点电压控制目标的同时体现对参加该控制任务的各分布式电源的公平性,电压控制分组的分布式控制策略以 DG 容量利用比为一致性变量,确保一个电压控制分组内的 DG 最终的容量利用比相同。

### 1.2 功率控制

功率平衡是配电网运行的一个重要约束,因此本文功率控制目标为调整配电网与外部电网交换的有功功率和无功功率为设定值,即控制图 1 中  $Q_{PCC}$  和  $P_{PCC}$  分别为其设定值  $Q_{set}$  和  $P_{set}$ 。若配电网自身能达到功率平衡,则设定值  $Q_{set}$  和  $P_{set}$  为 0。

对无功功率控制,将配电网中多个动态无功补偿装置构成无功控制分组‘GQ’。该组内某个装置通过实时测量  $Q_{PCC}$  计算无功功率交换差额,与组内其他无功补偿装置一起通过分布式优化算法实现无功功率控制目标,该组的分布式优化算法采用容量利用比为一致性变量,即在实现优化控制目标的同时使得所有补偿装置的利用比最终相同。

对有功功率控制,设置一个由数个 DG 构成的有功功率控制分组‘GP’来实现有功功率控制目标。该组内某个 DG 通过实时测量  $P_{PCC}$  计算有功功率交换差额,与组内其他 DG 一起通过分布式优化算法实现有功功率控制目标。本文分别采用 DG 的容量比和 DG 的功率因数为一致性变量来设计该组的分布式控制策略。

## 2 分布式优化控制策略

### 2.1 节点电压控制

以电压控制分组‘GV*i*’ ( $i=1,2,\dots,n$ )为例,设被控节点电压有效值为  $V_{CP,i}$ ,且可由组内某个 DG 实时测量得到。本文提出采用如下分布式协议对该

组第  $j$  个分布式电源的容量利用比进行迭代计算。

$$\delta_{S,i,j}(k+1) = \sum_{m=1}^{N_i} d_{S,i,jm} \delta_{S,i,m}(k) + d_{S,i,j} \varepsilon_{S,i} \Delta \delta_{S,i}^{\text{ref}}(k) \quad (1)$$

$$i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,N_i$$

式中:  $n$  为电压控制分组总数;  $N_i$  为第  $i$  个电压控制分组内 DG 总数;  $\delta_{S,i,j}(k)$  为第  $i$  个电压控制组内第  $j$  个分布式电源第  $k$  次迭代时的容量利用比;  $\varepsilon_{S,i}$  为迭代步长,也可称为控制因子,其取值大小影响算法收敛速度。 $\varepsilon_{S,i}$  越小,每次迭代修正量越小,收敛速度越小,但其值设置过大会发生振荡而不收敛。因此如何设计迭代步长吸引了不少研究者的注意,文献[24]给出了一个启发式设计方案。本文迭代步长依据其研究结果选取。

$d_{S,i,jm}$  为第  $i$  个电压控制组内分布式电源  $j$ 、 $m$  的信息权重,本文采用等权重方法[25],即

$$d_{S,i,jm} = \frac{S_{jm}}{\sum_{m=1}^{N_i} S_{jm}} \quad (2)$$

式中,若分布式电源  $j$  和  $m$  之间存在通信链接,则  $S_{jm} = 1 (j \neq m)$ , 否则  $S_{jm} = 0$ 。

$d_{S,i,j}$  用于标识负责节点电压测量的 DG,即对于电压控制组  $i$  中负责测量  $V_{CP,i}$  的 DG 有  $d_{S,i,j} = 1$ , 否则  $d_{S,i,j} = 0$ 。

$\Delta \delta_{S,i}^{\text{ref}}(k)$  为第  $i$  个分组第  $k$  次迭代时容量利用比变化量的参考值,为对其进行整定,首先定义该电压控制分组电压优化控制性能评估函数为

$$f_{V,i} = \frac{1}{2} (V_{CP,i} - 1)^2 \quad (3)$$

式中,  $V_{CP,i}$  为第  $i$  个电压控制分组受控节点电压的有效值。由  $d_{S,i,j}$  的定义可知,函数(3)仅为节点电压测量 DG 获知,从而  $\Delta \delta_{S,i}^{\text{ref}}(k)$  仅由该 DG 负责更新。

基于梯度下降优化方法原理,取  $\Delta \delta_{S,i}^{\text{ref}}(k)$  为目标函数  $f_{V,i}$  对  $\delta_{S,i,j}$  偏导数的负值,即

$$\Delta \delta_{S,i}^{\text{ref}}(k) = - \left. \frac{\partial f_{V,i}}{\partial \delta_{S,i,j}} \right|_{\delta_{S,i,j}(k)} \quad (4)$$

结合式(3)可得

$$\frac{\partial f_{V,i}}{\partial \delta_{S,i,j}} = \frac{\partial f_{V,i}}{\partial V_{CP,i}} \times \frac{\partial V_{CP,i}}{\partial P_{i,j}} \times \frac{\partial P_{i,j}}{\partial \delta_{S,i,j}} = (V_{CP,i} - 1) \times \frac{\partial V_{CP,i}}{\partial P_{i,j}} \times S_{i,j} \times \delta_{\cos,i,j} \quad (5)$$

式中:  $S_{i,j}$  为第  $i$  个分组中电压测量节点 DG 的容量;  $\delta_{\cos,i,j}$  为该 DG 功率因数; 偏导  $\partial V_{CP,i}/\partial P_{i,j}$  可看作受控节点电压相对该节点 DG 注入有功功率的敏感度, 根据潮流计算方程可求解得

$$\frac{\partial V_{CP,i}}{\partial P_{i,j}} = \frac{V_{CP,i}}{V_{CP,i}^2 G_{i,jj} + P_{i,j}} \quad (6)$$

式中:  $G_{i,jj}$  为第  $i$  个电压控制分组被控节点的节点网络自导纳;  $P_{i,j}$  为第  $i$  个分组中电压测量 DG 的有功出力。

## 2.2 交换功率控制

各个电压控制分组内的 DG 仅根据节点电压控制目标确定各自有功和无功出力, 在此基础上, 设置功率控制组 ‘GP’ 和 ‘GQ’ 来实现配电网与外部电网交换功率为设定值的目标。

无功功率控制组 ‘GQ’ 由散布在配电网内的多个无功补偿装置构成, 并设某个无功补偿装置可实时测量  $Q_{PCC}$ , 则该组第  $j$  个装置容量利用比的更新方法为

$$\delta_{S_{q,j}}(k+1) = \sum_{m=1}^{N_q} d_{S_{q,jm}} \delta_{S_{q,m}}(k) + d_{S_{q,j}} \varepsilon_{S_q} \Delta \delta_{S_q}^{\text{ref}}(k) \quad (7)$$

式中:  $N_q$  为分组 ‘GQ’ 内无功补偿装置的总数;  $\delta_{S_{q,j}}(k)$  为分组 ‘GQ’ 内第  $j$  个无功补偿装置第  $k$  次迭代时的容量利用比。权重系数  $d_{S_{q,jm}}$ 、标识  $d_{S_{q,j}}$  和步长  $\varepsilon_{S_q}$  的定义和求解方法与式(1)中对应变量的类似。

对于分组 ‘GQ’ 内各无功补偿装置容量利用比变化量的参考值  $\Delta \delta_{S_q}^{\text{ref}}(k)$  的计算方法为: 首先类似定义其无功功率控制性能评估函数如式(8)。

$$f_Q = \frac{1}{2} (Q_{PCC} - Q_{\text{set}})^2 \quad (8)$$

式中,  $Q_{PCC}$  和  $Q_{\text{set}}$  分别为配电网与外部电网交换的无功功率及其给定值。

取  $\Delta \delta_{S_q}^{\text{ref}}(k)$  为式(8)在  $\delta_{S_{q,j}}(k)$  处偏导数的负值, 可得:

$$\Delta \delta_{S_q}^{\text{ref}}(k) = - \left. \frac{\partial f_Q}{\partial \delta_{S_{q,j}}} \right|_{\delta_{S_{q,j}}(k)} = -(Q_{PCC} - Q_{\text{set}}) \times S_{q,j} \quad (9)$$

式中,  $S_{q,j}$  为分组 ‘GQ’ 内负责无功功率测量补偿装置的容量。

分组 ‘GP’ 负责完成有功功率控制目标。提出两种分布式控制策略, 策略①选取分组 ‘GP’ 内分布式电源的功率因数为一致性变量; 策略②选取容量利用比为一致性变量。

采用策略①时分组 ‘GP’ 内 DG 功率因数的更新方法为

$$\delta_{\cos,p,j}(k+1) = \sum_{m=1}^{N_p} d_{\cos,p,jm} \delta_{\cos,p,m}(k) + d_{\cos,p,j} \varepsilon_{\cos} \Delta \delta_{\cos}^{\text{ref}}(k) \quad (10)$$

式中:  $N_p$  为分组 ‘GP’ 内 DG 的总数;  $\delta_{\cos,p,j}(k)$  为分组 ‘GP’ 内第  $j$  个 DG 第  $k$  次迭代时的功率因数; 权重系数  $d_{\cos,p,jm}$ 、标识  $d_{\cos,p,j}$  和步长  $\varepsilon_{\cos}$  的定义和求解方法与式(1)中对应变量的类似。

采用策略②时分组 ‘GP’ 内 DG 容量利用比的更新方法为

$$\delta_{S_{p,j}}(k+1) = \sum_{m=1}^{N_p} d_{S_{p,jm}} \delta_{S_{p,m}}(k) + d_{S_{p,j}} \varepsilon_{S_p} \Delta \delta_{S_p}^{\text{ref}}(k) \quad (11)$$

式中:  $\delta_{S_{p,j}}(k)$  为分组 ‘GP’ 内第  $j$  个 DG 第  $k$  次迭代时的容量利用比; 权重系数  $d_{S_{p,jm}}$ 、标识  $d_{S_{p,j}}$  和步长  $\varepsilon_{S_p}$  的定义和求解方法与式(1)中对应变量的类似。

分组 ‘GP’ 采用策略①, 即式(10)中各 DG 功率因数变化量的参考值  $\Delta \delta_{\cos}^{\text{ref}}(k)$  和采用策略②, 即式(11)中各 DG 容量利用比变化量的参考值  $\Delta \delta_{S_p}^{\text{ref}}(k)$  的计算方法为: 首先类似地定义分组 ‘GP’ 控制性能评估函数如式(12)。

$$f_P = \frac{1}{2} (P_{PCC} - P_{\text{set}})^2 \quad (12)$$

式中,  $P_{PCC}$  和  $P_{\text{set}}$  分别为配电网与外部电网交换的有功功率及其给定值。

采用与计算  $\Delta \delta_{S_q}^{\text{ref}}(k)$  类似的方法可得:

$$\Delta \delta_{\cos}^{\text{ref}}(k) = -(P_{PCC} - P_{\text{set}}) \times S_{p,j} \times \delta_{S_{p,j}} \quad (13)$$

$$\Delta \delta_{S_p}^{\text{ref}}(k) = -(P_{PCC} - P_{\text{set}}) \times S_{p,j} \times \delta_{\cos,p,j} \quad (14)$$

式(13)中,  $S_{p,j}$ 、 $\delta_{\cos,p,j}$  和  $\delta_{S_{p,j}}$  分别为分组 ‘GP’ 内负责有功测量 DG 的容量、功率因数和容量利用比。

可以看到, 各个电压控制分组按控制策略式(1)、分组 ‘GQ’ 按控制策略式(7)、分组 ‘GP’ 按控制策略式(10)或式(11)独立运行, 实现各自的控制目标, 各个分组内部为完全分布式控制模式且各个分组之间无需信息交换。

## 3 仿真算例

### 3.1 仿真模型设置

本文采用 14 节点<sup>[26]</sup>测试系统, 该网络有 3 条

馈线，总额定负荷  $28.7+j7.75$  MVA。基准电压和功率分别为 23 kV 和 100 MVA。表 1 给出了各支路参数及各节点接入负荷情况。

在目标网络中接入 8 个 DG 以及 2 个 VC。其中，无功功率控制分组 ‘GQ’ 包含 7, 9 号节点所接入的 VC 装置，9 号节点 VC 负责测量  $Q_{PCC}$ ；有功功率控制分组 ‘GP’ 包含 3, 8, 11 号节点所接入的 DG，其中 3 号节点 DG 可实时测量  $P_{PCC}$ ；此外有两个电压控制组，其中分组 ‘GV1’ 包含 2, 5 号节点接入的 DG，控制 5 号节点的电压，且 5 号节点 DG 进行电压测量；分组 ‘GV2’ 包含 4, 13, 14 号节点接入的 DG，控制 14 号节点的电压，且 14 号节点 DG 进行电压测量。

表 1 IEEE14 节点配电网数据

Table 1 Parameter values of the IEEE14 nodes distribution network

支路编号	始端节点	末端节点	支路阻抗		末端节点负荷功率	
			电阻标幺值	电抗标幺值	有功/MW	无功/Mvar
1	1	2	0.075	0.1	2.0	1.6
2	1	3	0.11	0.11	4.0	2.7
3	1	4	0.11	0.11	1.0	0.9
4	2	5	0.09	0.18	2.0	0.55
5	2	6	0.08	0.11	3.0	1.3
6	5	7	0.04	0.04	1.5	1.2
7	3	8	0.08	0.11	5.0	1.8
8	8	9	0.08	0.11	4.5	-1.7
17	8	10	0.11	0.11	0.6	-0.5
18	3	11	0.11	0.11	1.0	-0.9
19	4	12	0.09	0.12	1.0	0.7
20	4	13	0.08	0.11	1.0	0.9
21	13	14	0.04	0.04	2.1	-0.8

图 2 为整个系统接线，各 DG 和无功补偿装置相关参数如表 2 所示。

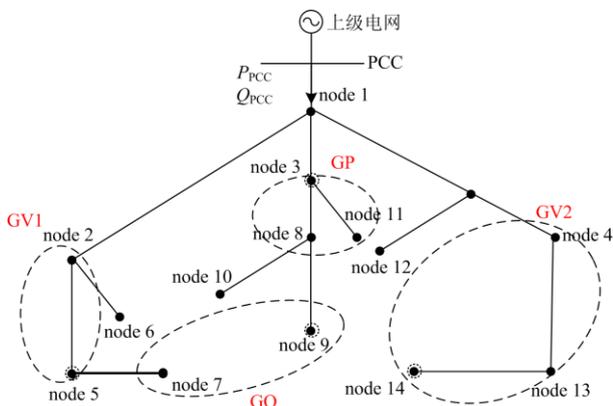


图 2 测试系统接线

Fig. 2 Wiring diagram of the test system

表 2 分布式电源及无功补偿装置参数

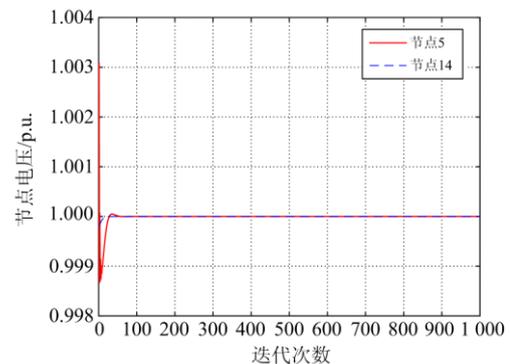
Table 2 Parameter values of DGs and VCs

编号	容量利用比初值	功率因数初值	容量/(kVA/kvar)
DG1	0.85	0.75	1 500
DG2	0.80	0.80	1 900
DG3	0.60	0.70	1 600
DG4	0.80	0.85	4 200
DG5	0.70	0.80	5 600
DG6	0.85	0.80	2 200
DG7	0.80	0.80	1 300
DG8	0.90	0.80	1 500
SVG1	0.95	—	1 600
SVG2	0.95	—	1 800

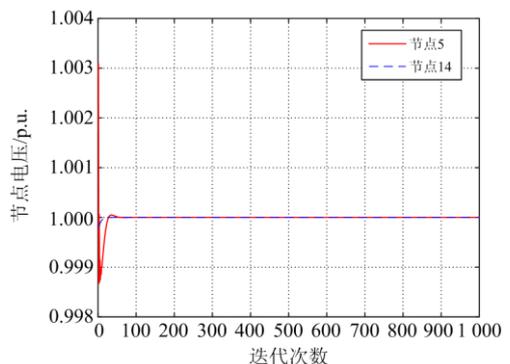
### 3.2 仿真算例 1

在该算例中，与外部电网交换的有功功率给定值为 14.35 MW，即总额定负荷的 50%；与外部电网交换的无功功率给定值为 0 Mvar；控制 5 和 14 号节点电压为 1 p.u.。本文将前后两次迭代结果相差小于  $10^{-4}$  作为收敛判据。

图 3 为两种有功功率控制策略下 5 号和 14 号节点电压迭代过程中的变化，图 4 为所有 14 个节点最终的电压分布。



(a) 策略①



(b) 策略②

图 3 被控节点电压

Fig. 3 Voltages of the nodes under regulation

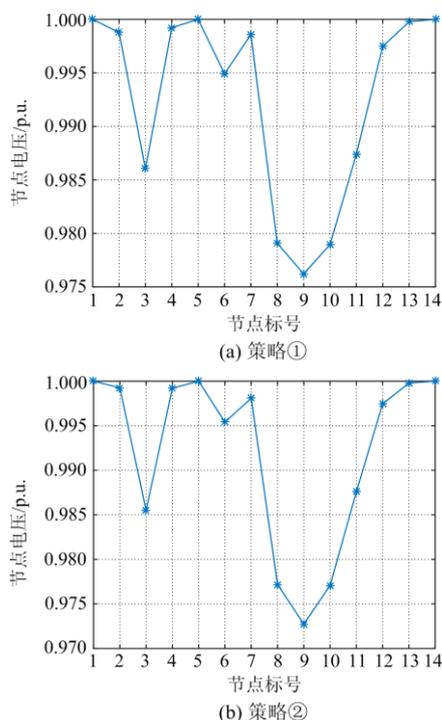


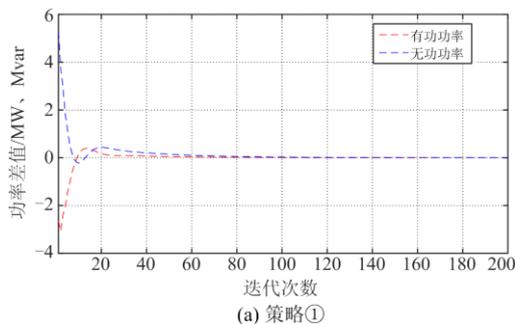
图4 14节点电压分布

Fig. 4 Voltage profile of all the nodes

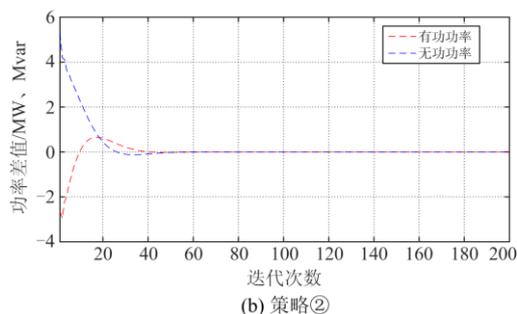
由图3可以看出,当分组‘GP’采用控制策略①时,5号和14号节点分别在第73次和第74次迭代时实现收敛至1 p.u.的控制目标,而采用控制策略②时则分别在第56次和第21次迭代时实现收敛至1 p.u.的控制目标。图4显示所有节点电压最终均处于0.97~1.01 p.u.范围内。结果表明本文的分布式节点电压优化控制算法具有良好的控制精度以及配电网电压整体控制效果。且较于策略①,策略②具有更快的收敛速度。

图5为配电网与外部电网功率交换误差的收敛情况。

由图5可知:采用控制策略①时功率差值 $P_{PCC}-P_{set}$ 和 $Q_{PCC}-Q_{set}$ 分别经过237和268次迭代后收敛至0,即 $P_{PCC}$ 和 $Q_{PCC}$ 分别收敛至14.35 MW和



(a) 策略①



(b) 策略②

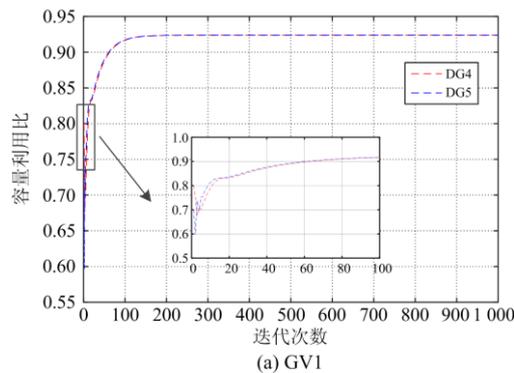
图5 PCC点交换功率误差

Fig. 5 Errors of the exchanged powers at PCC

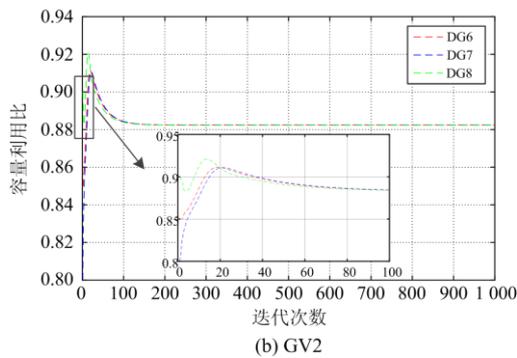
0 kvar;而采用控制策略②则分别需138和121次迭代。说明本文分布式无功和两种分布式有功功率控制策略均具有良好的控制精度,且较于策略①,策略②具有更快的收敛速度。

图6和图7分别给出了两个电压控制分组和无功功率控制分组的容量利用比,以及分组‘GP’采用控制策略①时功率因数和策略②时容量利用比的变化情况。

图6和图7表明:在有功功率控制分别采用控制策略①/②时,两个电压控制分组内DG的容量利用比分别收敛至0.9238/0.9777和0.8824/0.8714;无功补偿装置的容量利用比则收敛至-0.5205/-0.8578;分组‘GP’内DG功率因数/容量利用比为0.8333/0.7952。可以看到,采用本文的分布式优化控制策



(a) GV1



(b) GV2

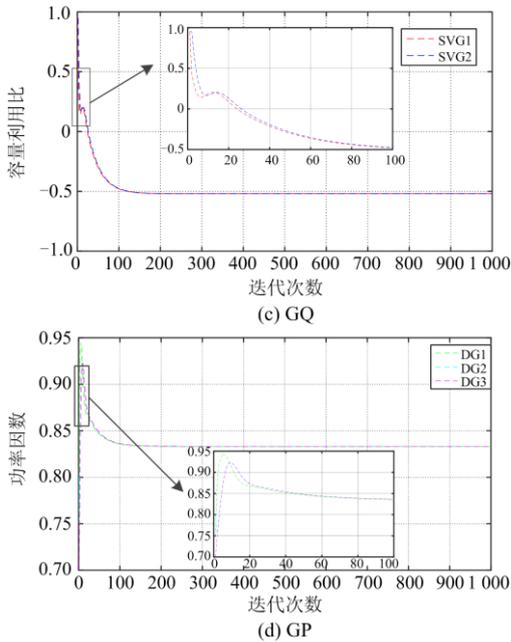


图 6 策略①时容量利用率及功率因数

Fig. 6 Capacity utilization ratios and PFs for strategy ①

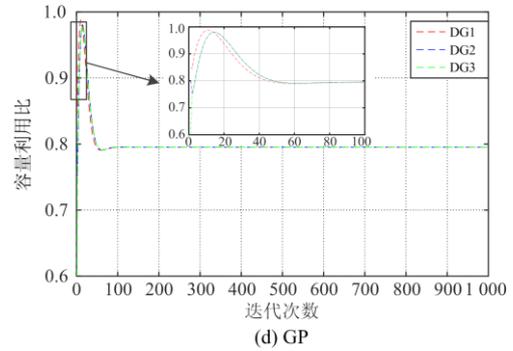
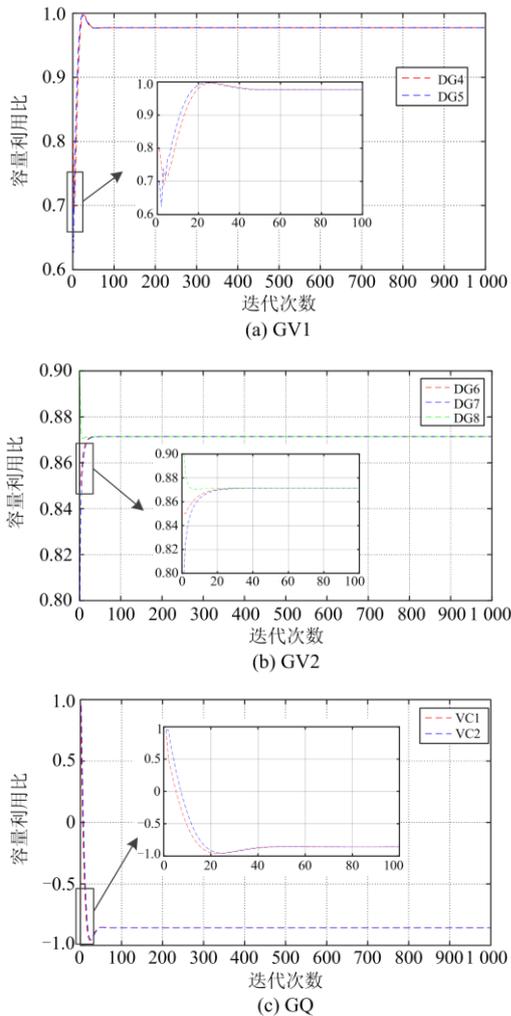


图 7 策略②时容量利用率

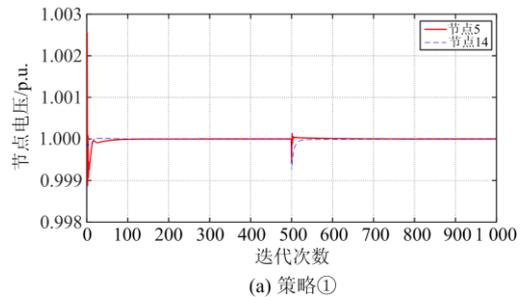
Fig. 7 Capacity utilization ratios for strategy ②

略时，各个 DG 分组和无功补偿装置分组均能在完成各种优化控制目标的同时实现容量利用率或功率因数一致意义上的公平性。而有功功率控制组采用容量利用率或功率因数作为一致性变量时对各个分组一致性变量最终收敛值会产生不同影响，其中以对无功功率控制分组‘GQ’的容量利用率影响较为明显。首先，不论采用何种一致性变量，无功补偿装置均运行于吸收无功功率的模式，这主要是 IEEE14 节点系统原本在多个节点具有固定无功补偿，另一方面电压控制分组采用容量利用率为一致性变量时，在输出有功功率的同时将输出一定比例的无功功率，引起配电网无功功率过剩，为实现与外部电网无功交换为 0 Mvar 的目标，需要两个 VC 吸收无功功率；此外，有功功率控制分组以功率因数为一致性变量，即采用控制策略①时，比以容量利用率为一致性变量时输出更多有功功率，导致无功功率控制分组吸收更多有功功率，使得容量利用率从 -0.5205 下降为 -0.8578。该结果表明在无功功率过剩时采用控制策略①将优化控制策略②。

### 3.3 仿真算例 2

本仿真以 3.2 中仿真为基础，在第 500 次迭代后在 2 号和 12 号节点各接入一个容量为 500 kVA，功率因数为 0.85 的负荷。

图 8 为整个迭代过程中 7 号和 14 号节点的电压，图 9 给出了负荷突增时功率交换差额的变动。



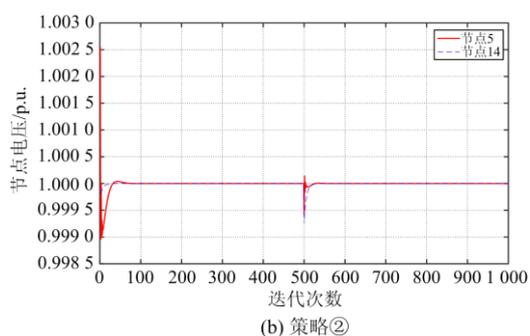
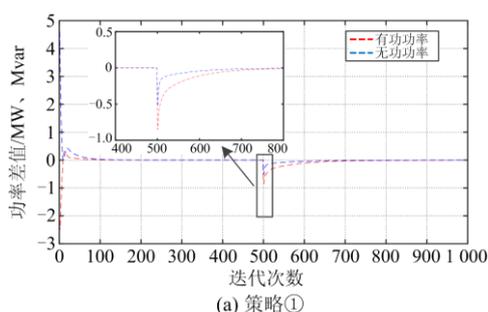
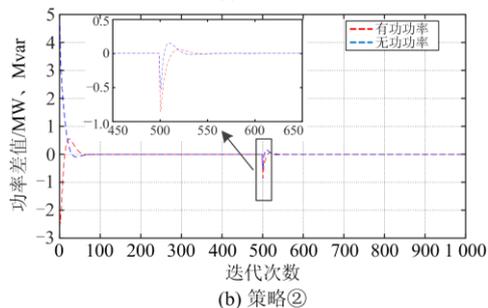


图8 负荷突增时被控节点电压

Fig. 8 Voltages of the nodes under control for load sudden increase



(a) 策略①



(b) 策略②

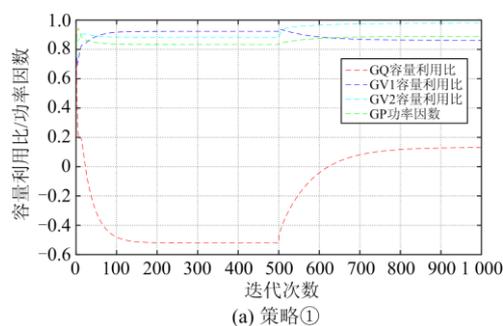
图9 负荷突增时交换功率的变化图

Fig. 9 Convergence of the exchanged power for sudden load increase

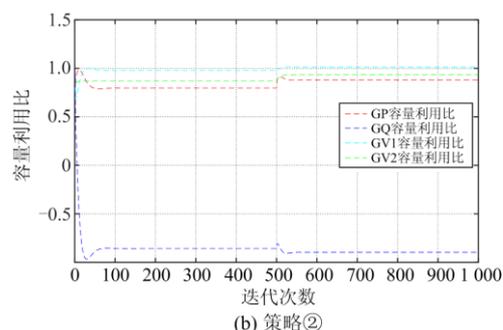
从图8中可以看出, 负荷突增后节点5和14的电压偏离额定值, 但两种有功功率控制策略均可在经过短暂过程后迅速使得电压恢复至1 p.u.。图9表明配电网与外部电网交换的有功和无功出现瞬时约0.85 MW和0.53 Mvar的差额, 在分布式控制算法的作用下该差额迅速减小到0, 仍然实现了功率控制目标。

图10给出了采用两种有功功率控制策略时各分组中代表性DG和VC的容量利用率或功率因数的变化情况。

从图10可以看出对于有功功率控制策略①, 由于负荷无功需求的增加, 无功功率控制组‘GQ’内‘VC’的容量利用率从-0.5205增加至0.1307, 开



(a) 策略①



(b) 策略②

图10 负荷突增时的容量利用率和功率因数

Fig. 10 Capacity utilization ratios and power factors for load sudden increase

始输出无功功率, 而两个电压控制组内DG的容量利用率分别重新收敛至0.8625和0.9783, 分组‘GP’内DG的功率因数从0.8333增加至0.8889。DG共计发出有功功率15.2 MW, 与VC一起发出无功功率8.2768 Mvar, 仍然将与外部电网交换的有功和无无功功率控制为设定值; 而对于有功功率控制策略②, 电压控制分组‘GV1’内DG的容量利用率已略大于1, 这与实际运行情况不符。说明了以容量利用率为一致性变量尽管有较快的收敛速度, 但调节范围不如以功率因数为一致性变量的控制策略。

仿真结果还表明: 负荷变动后, 对于有功功率控制策略①, 分布式无功功率控制算法在第893次迭代(即负荷变动后第393次)即重新达到收敛, 而电压控制组‘GV1’和‘GV2’分别在第553次、第596次即重新实现收敛。表明本文方法在负荷变动情况下仍可快速实现收敛, 算法对负荷变动具有较强的鲁棒性。

## 4 结论

本文基于分布式电源和无功补偿设备分组合作的思想, 以一致性控制协议为基础设计了包含节点电压控制、有功功率交换和无无功功率交换控制在内的配电网多目标分布式优化控制算法, 其中针对有

功率控制提出了分别以容量利用比和功率因数作为一致性变量的控制策略。所提出的算法仅需在各个分组内配置局部通信网络, 具有较好的系统可扩展性, 同时控制算法仅要求监测配电网与外部电网交换的功率和各被控节点的电压, 具有较好的实用性。仿真结果表明, 该算法可快速精确地实现多个重要节点电压的优化控制, 使得配电网全局电压具有良好的分布, 同时可将交换有功和无功功率控制为给定值, 所采用的控制策略具有精确性。采用功率因数为一致性变量的有功功率控制策略性能优于以容量利用比为一一致性变量的控制策略。所提出的算法在负荷变动时仍能快速准确实现各控制目标, 具有较强的鲁棒性。

### 参考文献

- [1] 钱峰, 陈艺, 刘俊磊, 等. 大规模风电接入的电力系统协调控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 12-18.  
QIAN Feng, CHEN Yi, LIU Junlei, et al. Coordinated control strategy for power systems with large-scale wind power integration[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 12-18.
- [2] 刘岩, 吴以岷, 徐荣敏, 等. 含智能负荷和分布式能源接入的配电网调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 116-123.  
LIU Yan, WU Yimin, XU Rongmin, et al. Research on distribution network scheduling with smart load and distributed energy access[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 116-123.
- [3] 叶鹏, 李山, 何淼, 等. 风储孤网系统运行与控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 163-170.  
YE Peng, LI Shan, HE Miao, et al. Review of operation and control of the wind storage isolated network system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 163-170.
- [4] 钱科军, 徐在德, 陈振宇, 等. 考虑用户舒适度的多样化负荷控制策略[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 1-5.  
QIAN Kujun, XU Zaide, CHEN Zhenyu, et al. Strategy of diversified load control considering user comfort[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 1-5.
- [5] CHEN H, WANG X, LI Z, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.
- [6] ANTONIADOU-PLYTARIA K E, KOUVELIOTIS-LYSIKATOS I N, GEORGILAKIS P S, et al. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2999-3008.
- [7] XIN H, ZHAO R, ZHANG L, et al. A decentralized hierarchical control structure and self-optimizing control strategy for F-P type DGs in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 7(1): 3-5.
- [8] GE X, HAN Q L, DING D, et al. A survey on recent advances in distributed sampled-data cooperative control of multi-agent systems[J]. Neuro Computing, 2017, 275: 1684-1701.
- [9] 黄彪, 朱自伟, 钟少云, 等. 基于一致性算法的主动配电网源-荷-储分布式协调优化调度[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 91-98.  
HUANG Biao, ZHU Ziwei, ZHONG Shaoyun, et al. Distributed coordinated optimal dispatch of source-load-storage in ADN based on consensus algorithm[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 91-98.
- [10] 孙延超. 多 Euler-Lagrange 系统分布式协同跟踪控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
SUN Yanchao. Research on multi-Euler-Lagrange system distributed coordinated tracking control[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2016.
- [11] 田静, 程月华, 姜斌, 等. 有限通信情况下的航天器编队协同控制研究[J]. 航天控制, 2014, 32(4): 75-81.  
TIAN Jing, CHENG Yuehua, JIANG Bin, et al. Research on cooperative control of spacecraft formation under limited information-exchange[J]. Aerospace Control, 2014, 32(4): 75-81.
- [12] AO Y, JIA Y. Distributed H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> consensus control and iterative approach for multi-agent systems with directed graph[C] // IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), January 15-17, 2018, Shanghai, China: 141-146.
- [13] GUO X, WANG J, LIAO F, et al. Quantized H-infinity consensus of multi-agent systems with quantization mismatch under switching weighted topologies[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(2): 202-212.
- [14] 阮博, 俞德华, 李斯吾. 基于一致性的微网分布式能量管理调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 23-28.  
RUAN Bo, YU Dehua, LI Siwu. Consensus algorithm based distributed energy management strategy of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 23-28.

- [15] 赵亦岚, 陈彬, 范元亮, 等. 虚拟发电厂分布式控制收敛速度分析及优化[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2288-2294.  
ZHAO Yilan, CHEN Bin, FAN Yuanliang, et al. Convergence speed analysis and optimization for distributed control of virtual power plant[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2288-2294.
- [16] VACCARO A, VELOTTO G, ZOBAA A F. A decentralized and cooperative architecture for optimal voltage regulation in smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4593-4602.
- [17] MAKNOUNINEJAD A, QU Z, ENSLIN J, et al. Clustering and cooperative control of distributed generators for maintaining microgrid unified voltage profile and complex power control[C] // IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, May 7-10, 2012, Orlando, FL, USA: 1-8.
- [18] GAO X, MENG K, DONG Z Y, et al. Cooperation-driven distributed control scheme for large-scale wind farm active power regulation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 1240-1250.
- [19] 陈晓祺, 贾宏杰, 陈硕翼, 等. 基于线路阻抗辨识的微电网无功均分改进下垂控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1271-1279.  
CHEN Xiaohui, JIA Hongjie, CHEN Shuoyi, et al. Improved droop control strategy based on line impedance identification for reactive power sharing in microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1271-1279.
- [20] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.  
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [21] 王婷. 基于模糊控制的 SVG 电压无功控制系统研究与应用[J]. 电气开关, 2016, 54(3): 84-87.  
WANG Ting. Research and application of SVG voltage and reactive power control system based on fuzzy control[J]. Electric Switcher, 2016, 54(3): 84-87.
- [22] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.  
FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.
- [23] 翟灏, 卓放, 易皓, 等. 基于 SVG 的电网多节点电压不平衡综合抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 40-47.  
ZHAI Hao, ZHUO Fang, YI Hao, et al. SVG based comprehensive unbalance suppression method for multi-node voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 40-47.
- [24] BINETTI G, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed consensus-based economic dispatch with transmission losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1711-1720.
- [25] XIN H, QU Z, SEUSS J, et al. A self-organizing strategy for power flow control of photovoltaic generators in a distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1462-1473.
- [26] 齐晖, 程初俐, 史军, 等. 采用最优场景法求解含风电的无功优化模型[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 18-28.  
QI Hui, CHENG Renli, SHI Jun, et al. Optimal scenario method for solving reactive power optimization model incorporating wind farms[J]. Guangdong Electric Power, 广东电力, 2019, 32(6): 18-28.

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-12-22

作者简介:

乐健(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事智能电网运行与控制技术研究; E-mail: lej01@tsinghua.org.cn

周谦(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式优化控制和经济调度;

王曹(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源发电并网运行与控制技术研究。

(编辑 葛艳娜)