

考虑缺电损失评价的主动配电网网架规划研究

陈后全, 张思东, 喻恒凝, 唐超, 黄力, 黄云辉

(武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 研究了一种考虑缺电损失评价的主动配电网网架规划方法。首先, 评定不同类负荷的缺电损失以构建用户缺电损失函数, 将配电网安全风险评估下的用户缺供电量与各类用户缺电损失函数相乘, 得到可靠性代价成本, 从而建立可靠性与经济性相协调的主动配电网网架规划模型。然后, 采用改进粒子群算法求解主动配电网网架的最佳方案。以某市新建开发区为例进行分析, 与传统规划模型结果对比, 该方法的规划结果增加了在重要负荷区域的线路投资, 减少了重要负荷区的缺供电量, 大大降低了可靠性代价费用, 能有效提高配电网的可靠性, 且有效减少了网损费用及阻塞费用, 降低整体投资运行费用, 验证了该方法用于主动配电网网架规划的可行性。

关键词: 缺电损失评价; 可靠性与经济性; 粒子群算法; 主动配电网网架规划

Research on active distribution network frame planning considering power loss assessment

CHEN Houquan, ZHANG Sidong, YU Hengning, TANG Chao, HUANG Li, HUANG Yunhui

(School of Automations, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A method for active distribution network frame planning considering power loss assessment is studied. Firstly, in order to establish the planning model, the power loss of different loads is evaluated to construct the user's power loss function. The power supply loss of users under the safety risk assessment of the distribution network is multiplied by the power loss function of various types of users to obtain the reliability cost. Then, the improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the optimal scheme of distribution network. Compared with the traditional planning model, the planning result based on the reliability and economic coordination planning model increases the lines investment and reduces the power shortage in the important load area. As a result, it greatly reduces the cost of reliability, effectively improves the reliability of distribution network, and effectively reduces and the overall investment operation cost, verifies the feasibility of this planning method for distribution network with PV energy integration.

Key words: power loss assessment; reliability and economy; particle swarm optimization; planning of active distribution network

0 引言

随着目前电网规模扩大与负荷需求的不断增长, 分布式电源、电动汽车等各类用电

国家自然科学基金资助项目 (51607130)

负荷的接入规模正在逐步扩大。截止到2018年年底, 我国分布式光伏发电装机容量为1.74亿kW, 分布式风电装机容量为1.84亿kW, 电动汽车保有量261万辆。大规模分布式电源 (Distributed Generation, DG) 和多元化负

荷接入将对配电网的安全可靠运行带来新的挑战,提升了配电网规划的难度。在提升配电网经济性的同时,也要考虑在一定程度上加大投资以提高系统的安全、可靠性水平,从而收获相应的经济、社会效益。因此,如何进行既可靠又经济的主动配电网规划成为了当前的研究热点。

目前国内外学者针对主动配电网网架规划方法已有了大量的研究。文献[1-3]在规划时考虑了DG随机出力与可控负荷间的相互影响,充分利用DG减小线路损耗的能力,提升规划结果的经济性。文献[4]在进行含多个电源的园区规划时,建立了以总成本最小为目标的非线性配电网网架规划模型,引入埃尔米特矩阵消除模型中二进制变量和整数变量的乘积项,将原非线性模型简化为二阶锥模型。上述方法虽然能获得经济性很好的网架方案,但却忽略了网架的可靠性,对此,部分文献对如何提高配电网的可靠性进行了研究。文献[5-7]以电压稳定裕度最大及经济效益最大为目标函数,寻找合理的DG接入容量及接入位置,得到可靠性与经济性均较好的规划方案。文献[8-10]从配电网自身网架结构角度出发分析网架的可靠性,通过提高网架自身的联络率得到停电时间更短、线路利用率更高的规划方案,但未考虑商住小区等以电缆线为主的规划区域。文献[11]采用将供电区域按负荷节点划分为子区域,然后分别对各子区域网架规划来获得更好的可靠性,但是小区域规划间彼此独立,易导致线路负荷分布不均,线路利用率低等,增加系统的经济成本。

本文将配电网用户分类,评定不同类负荷的缺电损失来构建综合用户缺电损失函数,再将各用户缺电损失函数乘以用户缺供电量,得到可靠性代价成本,从而实现可靠性的经济性量化。将其加入传统配电网网架规划模型的目标函数,以此构建考虑用户缺电损失评价的主动配电网网架可靠性与经济性协调的规划模型。以某市新建开发区为算例,考虑实地DG

分布与出力特征,进行了主动配电网网架规划,验证本文所提方法的合理性。

1 配电网规划模型

1.1 传统配电网网架规划模型

传统配电网的规划主要考虑以经济性为目标,最优方案为投建费用最小方案,目标函数一般包括网架优化方案的线路投资成本与运行成本。

(1) 投资费用

在实际的配电网网架规划中,投资成本一般包括购地成本、杆塔、导线、分段开关、联络开关以及其他设备购买与安装成本,在规划模型中,一般将其归纳为单位长度线路投资成本,故投资成本计算公式为

$$f_{\text{inv}} = K \sum_{i=1}^n C_i n_i \quad (1)$$

$$K = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (2)$$

式中, r 为资金贴现率; n 为分摊年限; C_i 为线路的单位投资费用,架空线路取50万元/km,电缆线路取80万元/km; l_i 、 n_i 分别为第*i*条线路走廊的长度和新建线路回数。

(2) 网损费用

网损费用主要指电网运行中网络有功损耗,网损费用 f_{loss} 的表达式为

$$f_{\text{loss}} = C_p \times \sum_{i \in \Omega} I_i^2 R_i \quad (3)$$

式中, C_p 为电价系数,单位为元/(kW·h); Ω 为线路集合。

(3) 阻塞费用

阻塞费用为由于线路容量不足而造成发电机出力降低时,电网对发电厂商的赔偿费用,阻塞费用 f_{conges} 的表达式为

$$f_{\text{conges}} = \sum_{i=1}^n (a_i g_i - a_i g_{i_lim}) \quad (4)$$

式中, n 为系统中发电机的数量; g_{i_lim} 、 g_i 分别为有无线路约束下的发电机出力; a_i 为发电机出力成本。

通过上述经济成本构成及计算方法分析，电网规划模型为

$$\min K \sum_{ij \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + P_e \sum_{l=1}^s T^l \sum_{ij \in \Omega} (f_{ij}^l)^2 R_{ij} + \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^s T^l \sum_{i=1}^{n_g} (a_i g_i^l - a_i g_{i-\lim}^l)$$

$$f_{ij}^l - \gamma_{ij} (n_{ij}^0 - n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad l=1, \dots, s \quad (6)$$

$$Sf^l + P^l = d^l \quad l=1, 2, \dots, s \quad (7)$$

$$|f^l| \leq \bar{f} \quad e=1, 2, \dots, s \quad (8)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (9)$$

式(6)、式(7)为潮流功率平衡约束。式(8)为线路容量约束。式(9)为发电机出力约束。其中， $\bar{f}$ 为线路容量上限； $P_g^{\max}$ 、 $P_g^{\min}$ 分别为发电机出力上下限。

1.2 考虑缺电损失评价的配电网网架规划模型

本节将暂态安全风险评估下的用户缺供电量与各类用户缺电损失函数相乘，来作为配电网的可靠性成本。为了便于计算，本节通过缺电损失评价率 I_{EAR} 表示缺电成本。其计算步骤包括：

1) 根据不同单位负荷性质将用户分为工业、商业、居民和政府部门等几大类。

2) 充分调查各类用户在不同停电时间下的经济损失，构建用户缺电损失函数 $f_{\text{SDEj}}(t)$ ， $j=1, 2, \dots, m$ ，单位为元/(kW·h)。

$$f_{\text{SDEj}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{CDEi}}}{n_j} \quad (10)$$

式中， f_{CDEi} 为第*i*个用户的缺电损失； n_j 为第*j*类用户总数。

3) 综合考虑停电持续时间、停电频率及用户缺电损失函数，计算各节点缺电损失评价率 I_{EARi} ，即

$$I_{\text{EARi}} = \frac{\sum_{k=1}^m f_k C_{ik}(d_k) L_{ik}}{\sum_{k=1}^m L_{ik} f_k d_k} \quad (11)$$

式中， f_k 为故障发生的概率； d_k 为该故障的持

续时间； L_{ik} 为故障发生时节点*i*的缺供电量； $C_{ik}(d_k)$ 为对应的节点综合缺电损失函数，由节点各类负荷比例决定； m 为故障次数。

在实际规划中，缺电损失评价率 I_{EARi} 也采用近似计算的方法，其表达式为

$$I_{\text{EARi}} \approx \frac{C_i(\bar{d}_i)}{\bar{d}_i} \quad (12)$$

式中， $\bar{d}_i$ 为节点*i*的停电持续时间期望值； $C_i(\bar{d}_i)$ 为节点*i*的实际缺电损失。

可靠性代价成本的表达式为

$$f_{\text{security-loss}} = \sum_l T_l \sum_{i=1}^n I_{\text{EARi}} \text{EENS}_i \quad (13)$$

式中， EENS_i 为负荷节点*i*的缺供电量。

考虑可靠性代价成本后，目标函数可更新为

$$\begin{aligned} \min K \sum_{ij \in \Omega} C_{ij} l_{ij} n_{ij} + \sum_{l=1}^s T_l \sum_{i=1}^{n_g} (a_i g_i^l - a_i g_{i-\lim}^l) + \\ P_e \sum_{l=1}^s T^l \sum_{ij \in \Omega} R_{ij} (f_{ij}^l)^2 + \sum_{l=1}^s T_l \sum_{i=1}^n I_{\text{EARi}} \text{EENS}_i' \end{aligned} \quad (14)$$

2 基于粒子群算法的主动配电网网架规划求解

粒子群算法是一种针对全局进行优化的算法，通过粒子的不断迭代以寻求最优解，具有实现简单、准确度好及收敛快等优点。

粒子拥有位置 X_i^t 与速度 v_i^t 两种属性，位置代表该粒子当前值，速度代表粒子下次迭代变化量，其表示形式为

$$X_i^t = (X_{i1}^t, X_{i2}^t, \dots, X_{iD}^t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

$$v_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

式中， D 为搜索空间维度； N 为种群规模。

完成一次计算后，下次计算第*i*个粒子的位置可根据如下公式更新，即

$$v_{id}^{t+1} = v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (17)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^t \quad (18)$$

式中， c_1 、 c_2 为学习因子； r_1 、 r_2 为随机数。

为了进一步提高粒子群算法的收敛速度，文献[12]采用了带有惯性权重的粒子群算法。将粒子更新公式改进为

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{gd}^t) \quad (19)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (20)$$

式中, w 为惯性权重, 调整其值可以改变粒子群算法的搜索能力。

此外, 本文还采用了变异扰动操作来避免求解过程中陷入局部最优解。利用改进粒子群算法对前文模型进行规划求解, 规划求解流程为:

1) 输入配电网的原始数据。

2) 生成初始粒子群, 每个粒子的第 N 个数代表第 N 条可扩展线路走廊, 数值的大小为该走廊上新建的线路回数。

3) 进行约束判断, 如果不满足约束条件, 则将其适应度值乘以惩罚因子。

4) 对于满足约束条件的方案, 计算每个方案的经济性成本与可靠性代价成本记为总适应度值, 将最小的适应度值记为个体极值。

5) 更新全局极值, 记录其相应的粒子。

6) 对全局极值对应的粒子做交叉变异操作, 全局极值连续不变时, 进行扰动操作, 更新粒子的速度和位置。

7) 迭代次数或扰动次数达到最大时, 则输出最优粒子。否则, 返回步骤3)。具体规划求解流程图如图1所示。

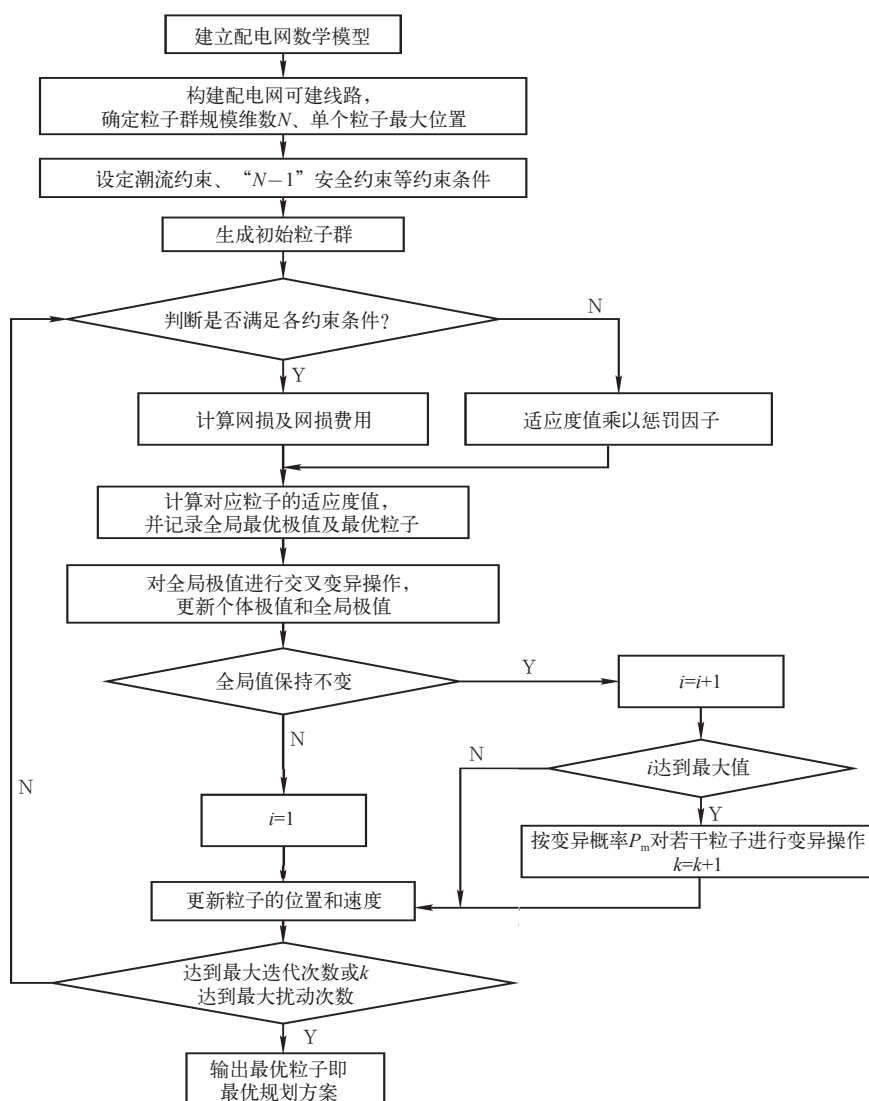


图1 基于改进粒子群算法的主动配电网经济性规划流程

Fig. 1 Planning process of active distribution network based on improved particle swarm optimization algorithm

3 基于可靠性与经济性协调的主动配电网网架规划

以某一区新建规划区为算例，其路网示意图如图2所示。规划区域总面积为14.57 km²，将该园区规划用地划分为工业用地、居住用地和商业服务业设施用地等，对不同用途的园区用地进行负荷预测分析，所得具体数据如表1所示。

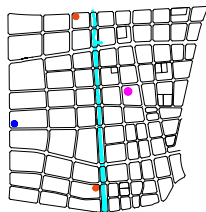


图2 某新建规划区路网示意图

Fig. 2 Road network diagram of the planning area

表1 负荷预测表

Tab. 1 Load forecasting

用地类型	用地面积/ 公顷	负荷指标/ (kW/公顷)	用电负荷/ MW
工业用地	496.40	80	39.71
居住用地	446.12	100	44.61
商业服务业设施用地	96.20	300	28.86
公共服务设施用地	131.51	150	19.73
其他用地	286.78	15	4.30
合计	1 457.00	—	137.21

同时系数取0.8，则该园区目标年最大负荷为109.77 MW。此外在计算中取功率基准值为100 MW。10 kV架空线路投资根据实际配电网建设情况，双回线路一般公用杆塔，可以省去第二回线路的杆塔及购地成本，故设置第二回线路成本为第一回的一半；网损费用及发电机出力的单位电价取0.176元/(kW·h)。

将该园区模拟为47个负荷节点组成的配电系统，各节点负荷参数如表2所示。根据当地实际情况，DG一般以分布式光伏为主，一般主要分布在工业区，商住区的分布式光伏数量较少，故主要在工业区负荷节点配置一定量的分布式光伏，采用T接形式接入，具体数据如表3所示。粒子群算法具体参数如表4所示。

利用前文所述方法构建传统经济性规划模型和基于可靠性与经济性协调的规划模型，利

表2 节点负荷

Tab. 2 Nodal load

(单位: MW)

节点编号	节点负荷	节点编号	节点负荷	节点编号	节点负荷
1	3.25	17	2.06	33	2.69
2	2.32	18	2.7	34	2.12
3	3.06	19	2.12	35	1.92
4	3.16	20	2	36	2.55
5	2.21	21	2.08	37	1.76
6	2.62	22	2.43	38	1.59
7	2.49	23	2.56	39	1.45
8	1.78	24	2.72	40	2.45
9	1.85	25	2.57	41	2.56
10	2.6	26	1.53	42	1.48
11	2.6	27	1.45	43	2.04
12	2.64	28	3.06	44	2.72
13	2.64	29	2.9	45	1.81
14	2.39	30	2.54	46	1.86
15	2.74	31	2.54	47	2.41
16	2.06	32	2.69		

表3 分布式光伏接入位置及容量

Tab. 3 Location and capacity of distributed PV

(单位: MW)

接入位置	计入容量	接入位置	计入容量	接入位置	计入容量
1	2.00	17	2.06	33	2.69
3	2.00	28	2.7	41	2.12
4	2.00	29	2.12	44	1.92
15	3.16	32	2	47	0.8

表4 粒子群算法求解过程参数表

Tab. 4 Process parameters of particle swarm optimization algorithm

参数	取值
种群规模 N/个	150
最大迭代次数/次	100
权重	0.9、0.4
学习因子	0.5、2.5
扰动次数/次	15
粒子群向量维度 D/维	104
变异概率 (%)	25

用粒子群算法分别得出最优规划方案。两种规划方法适应度值迭代曲线对比如图3所示。传统经济性模型规划结果示意图如图4所示。可靠性与经济性协调模型规划结果示意图如图5所示。两种规划方案结果对比如表5所示。

对比两种规划方法所得方案，与传统方案相比，考虑缺电损失评价的规划结果在商住区新建了较多线路，以增加商住区等缺电损失函数数值较高区域的供电可靠性。由表5可知，与传统规划方案相比，基于可靠性与经济性协调规划模型规划结果虽然增加了线路投资，但有效减少了网损费用及阻塞费用；在可靠性成本

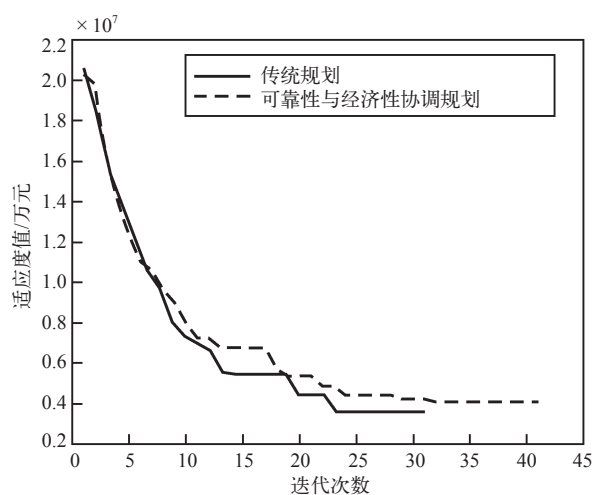


图3 适应度值迭代曲线对比

Fig. 3 Fitness value comparison

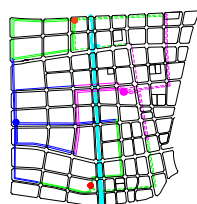


图4 传统规划结果示意图

Fig. 4 Schematic diagram of traditional planning results

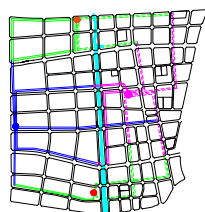


图5 可靠性与经济性协调规划结果示意图

Fig. 5 Schematic diagram of reliability and economic coordination planning results

表5 规划方案结果对比

Tab. 5 Comparison of planning results

参数指标	传统经济性模型	可靠性与经济性协调模型
线路回数	30	36
总投资费用/万元	2 798.29	3 109.06
年投资费用/(万元/年)	363.78	404.18
网损费用/(万元/年)	95.73	79.75
阻塞费用/(万元/年)	0.62	0.43
用户缺供电量/(万 kW·h/年)	8.58	4.15
可靠性代价费用/(万元/年)	77.22	24.90
年费用合计/(万元/年)	537.35	509.26

方面,可靠性与经济性协调规划结果增加了在商住区等负荷等级高的地方的线路投资,减少

了重要负荷区的缺供电量,降低了综合缺电损失函数数值,使得可靠性费用比传统方案低得多,综合年等值费用比传统方案低28.09万,证明了本文提出模型的合理性。

4 结束语

研究了考虑缺电损失评价的主动配电网网架可靠性与经济性协调规划研究方法。首先建立了传统经济性配电网网架规划模型,以用户缺电损失来构建综合用户缺电损失函数,以缺电成本将可靠性做经济性等效衡量并加入目标函数,建立了考虑缺电损失评价的可靠性与经济性协调的规划模型。其次,将改进的粒子群算法运用于构建的配电网网架规划模型,得到算法的主要步骤及规划流程图。最后,以某市新建开发区为例,比较两种模型最后求得的最优网架优化方案。结果表明,可靠性与经济性协调规划模型规划结果虽然增加了线路投资,但有效减少了网损费用及阻塞费用;在可靠性成本方面,增加了在重要负荷区域的线路投资,减少了重要负荷区的缺供电量,降低了综合缺电损失函数数值,大大降低了可靠性代价费用,有效地提高了配电网的可靠性,验证了本文所提配电网网架规划方法的可行性。

参考文献

- [1] 石季英,薛飞,李雅静,等.基于免疫二进制萤火虫算法的主动配电网低碳目标网架规划[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(5): 507-513.
- [2] 卢艺,戴月,马伟哲,等.含分布式电源和储能装置的配电网分散式动态最优潮流[J].电网技术,2019,43(2): 434-444.
- [3] 方陈,张翔,程浩忠,等.主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J].电网技术,2014,38(4): 823-829.
- [4] JABR R A. Polyhedral formulations and loop elimination constraints for distribution network expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2013, 28(2): 1888-1898.
- [5] 赵文杰, 曹昉, 金锋. 基于最小电压稳定裕度的分布式风电在配电网中的选址定容[J]. 智能电网, 2016, 4(2): 190-197.
- [6] 白晓清, 吴雪颖, 李佩杰, 等. 计及电压稳定裕度的配电网光伏发电选址与定容[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 34-41.
- [7] 程江洲, 李晓敏. 基于二次锥优化的辐射状配电网静态电压稳定裕度计算[J]. 电测与仪表, 2018, 55(3): 37-40, 54.
- [8] 吴霜, 卫志农, 孙国强, 等考虑网络抗毁性的配电网网架多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 137-142.
- [9] 韩畅, 林振智, 杨莉, 等. 考虑经济性和网架性能的抗灾型骨干网架多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 34-44, 104.
- [10] 杨丽徙, 曾新梅, 方强华, 等. 基于抗毁性分析

的中压配电网拓扑结构[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 65-69.

- [11] 徐芮, 刘俊勇, 刘友波, 等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主次网架规划方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 48-55, 63.
- [12] 王庆荣, 王瑞峰. 基于改进粒子群算法的配电网重构策略[J]. 计算机应用, 2018, 38(9): 2720-2724.

作者简介



陈后全

陈后全(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子化系统的运行与稳定性分析。

(收稿日期: 2019-07-29) **EA**

(上接第23页)

- energy management[C]. Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2017: 4813-4820.
- [74] BUI Van-Hai, HUSSAIN Akhtar, KIM Hak-Man. A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1323-1333.
- [75] 陈其森, 汪湘晋, 池伟, 等. 多微电网互联系统能量管理方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 83-91.
- [76] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [77] 戴上, 张焰, 祝达康. 含有微电网的配电网规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 41-45.
- [78] DING Ming, MA Kai, BI Rui, et al. A hierarchical control scheme based on multi-agent system for islanded multi-microgrids[C]. Proceedings of 4th IEEE International Symposium

on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Rogers, AR, USA, 2013: 1-5.

- [79] 王思明, 牛玉刚, 方磊, 等. 考虑新能源出力不确定性的微电网社区双阶段调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 89-98.

作者简介



戴志辉

戴志辉(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制、新能源电力系统。

鲁浩(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性及新能源电力系统。

刘媛(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性及新能源电力系统。

(收稿日期: 2019-09-26) **EA**