

DOI: 10.7667/PSPC161583

## 配电网降损综述

应丽云, 刘敏, 邓磊, 孙江山

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 较为全面地综述了国内外关于降低配电网损耗的研究状况。首先介绍了配电网损耗产生的原因, 包括设备损耗和系统运行损耗两个方面。然后分别从设备配置和系统运行两个方面总结了当前各类降低配电网损耗的研究现状和存在的问题。并考虑多项降损措施的组合效果更明显, 对当前研究比较广泛的无功优化、配电网重构和分布式电源优化等降损措施之间组合优化的研究现状进行综述。最后指出了当前配电网降损研究主要存在的问题及下一步可能的研究方向。

**关键词:** 降损; 无功优化; 配网重构; DG 优化; 综合优化

### A comprehensive review of the loss reduction in distribution network

YING Liyun, LIU Min, DENG Lei, SUN Jiangshan

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The research status on distribution network loss reduction at home and abroad is reviewed comprehensively. Firstly the forming reason of network power loss is introduced, including equipment loss and system operation loss. Then the present research situation and problems of various loss reduction techniques based on equipment configuration and system operation are summarized respectively. Considering the better effect of the combination of different loss reduction techniques on loss reduction, the combination loss reduction techniques of reactive power optimization, distribution network reconfiguration and distributed generation optimization at present are discussed. Finally, the existing problems of the current distribution network loss reduction and the probable development trend in the future are pointed out.

**Key words:** loss reduction; reactive power optimization; distribution network reconfiguration; DG optimization; comprehensive optimization

## 0 引言

随着全球能源危机的日益严峻, 开展节能减排和发展新能源技术已经成为世界各国发展的共识。电力行业作为我国能源消耗的主要行业, 最大限度地降低电网损耗是缓解能源危机和实现节能减排的重要手段。我国配电网由于网架结构薄弱和设备老化等原因, 其损耗占电网总损耗的较大比例<sup>[1]</sup>。因此, 研究如何降低配电网损耗尤为重要。

本文首先分析了配网损耗产生的原因, 然后根据近年文献, 分别从设备配置和系统运行两个方面总结了各类降损措施的研究现状。并对当前研究比

较广泛的无功优化、配电网重构和分布式电源优化等降损措施之间组合的研究现状进行综述。最后指出当前配网降损措施存在的主要问题和未来配网降损措施的研究方向。

## 1 配网损耗

配电网作为电力网终端, 直接与用户相连。在传送到用户的配电环节, 由于配电网阻抗的存在, 电能转换、输送和分配过程不可避免地产生大量损耗, 这个电能损耗被称为配电网损耗。

配电网损耗主要集中在电力设备上产生, 包括变压器和配电线路等; 此外, 配电网运行方式、三相负荷不平衡、电力谐波和负荷波动等因素也会产生附加损耗<sup>[2]</sup>。

根据配网线路功率损耗关系可知, 降低线路电阻、提高线路电压和改变功率因数均可以降低配网

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合 J 字[2012]2157号); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZ2015-2-0069)

线路损耗。增大导线截面和减少线路长度可以减小电阻, 从而降低线损。减少低压供电长度, 采用中压等级供电, 相当于提升供电电压, 也可以实现降损。配网中通过无功就地补偿方式, 可以提高负载功率因数, 减少线路输送无功电流, 从而降低配网损耗。

对于变压器采用节能型变压器可以降低铁耗, 从而降低变压器损耗。

此外, 配电网还可采用平衡三相负荷、消除谐波和改善负荷分布等方法实现降低配电网损耗。

## 2 配网降损措施

本节分别从设备和系统运行角度归纳出降低配网损耗的措施, 并综述各类措施的研究现状和存在问题。

### 2.1 设备方面

#### 2.1.1 线路

对线路进行合理改造, 可以降低配网损耗。比如更换输电线路导线截面、减少 10 kV 馈线供电半径<sup>[2]</sup>等。

#### 2.1.2 合理配置变压器

合理配置变压器指在规划和设备改造中, 在寿命期内选择经济效益最佳的变压器型号、容量和台数, 达到降低配网损耗的目的<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.3 配置无功补偿装置

配置无功补偿装置, 可以减少配网无功大量传输, 提高负荷功率因数, 从而降低线路功率损耗<sup>[4]</sup>。

电容器组是电网中使用最普遍的无功补偿装置, 对无功优化配置的研究主要以电容器组为对象。

无功补偿配置常以系统网损最小和改善电压分布<sup>[5-6]</sup>为目标。从经济性角度考虑, 也将投资费用和运行费用最小作为目标<sup>[7]</sup>。文献[8]还考虑随时间变化的负载、年度负荷增长率和随时间变化的有功无功电价的情况, 建立新的综合费用目标函数, 更符合实际。

约束条件包括功率平衡约束、运行约束和可用资源约束。对约束条件处理时, 可利用拉格朗日乘数法将其加入到目标函数中转化为柔性约束条件, 提高优化的灵活性和全局性。文献[7-8]将母线电压限制通过越界罚函数加入到目标函数中, 避免不可行解产生。

配置无功补偿装置的研究主要是确定安装位置和容量。对于电容器组安装位置的确定, 文献[6,9]采用灵敏度分析方法先确定无功补偿装置的候选母线, 再使用人工智能算法确定具体的无功补偿位置和容量, 可以减少搜索空间, 提高计算速度。文献

[5]先以无功损耗最小和维持电压约束为目标通过模糊算法确定电容器组位置, 再根据拖拽青蛙跳算法以损耗最小为目标确定配网电容器组最优容量, 计算速度加快。文献[7]提出一种线性模型, 采用混合整数线性规划算法确定电容器组最优位置和容量, 模型和方法简单, 计算时间更少。

配置无功补偿装置的研究中, 还需要考虑 DG 的接入情况<sup>[7]</sup>, 但没有考虑分布式能源的随机出力问题。对于负荷的不确定性问题, 很多研究只考虑几种不同负载下电容器组的配置问题<sup>[7,9]</sup>, 没有建立负荷的不确定性模型。

实际配电网中存在负荷三相不平衡和谐波情况, 大部分文献没有考虑这些因素。

#### 2.1.4 配置分布式电源

分布式电源的接入改变原先潮流分布, 进而影响网络损耗大小。通过合理配置 DG, 可以实现网损最小。

对分布式电源配置前需建立分布式电源模型。部分文献假定 DG 出力恒定, 建立 DG 的简化模型<sup>[3,10-11]</sup>。但实际上 DG 出力具有间歇性和随机性, 为了更符合实际情况, 可以采用概率统计法<sup>[12]</sup>、场景分析法<sup>[13]</sup>、蒙特卡洛法<sup>[14]</sup>和多状态分析法<sup>[15-16]</sup>模拟 DG 出力的随机特性。也可以通过置信水平定量描述 DG 随机出力的模糊性<sup>[17]</sup>。为提高 DG 出力的消纳, 配置 DG 时考虑不同类型 DG 出力的时域和地域互补性<sup>[13]</sup>。考虑到负荷实时变化性, 部分文献根据负荷的不确定性, 建立负荷的随机模型<sup>[14-16]</sup>。

配置分布式电源常以有功损耗最小<sup>[10-12]</sup>和年损耗电量最小<sup>[13]</sup>为目标; 考虑经济性则以总费用最小<sup>[3,16]</sup>为目标, 包括投资成本费用、购电费用、运行维护费用和有功损耗费用; 还有考虑可靠性, 将可中断供电负荷赔偿费用<sup>[14]</sup>计入费用目标函数; 从节能环保角度考虑, 计入废弃减排费用<sup>[15]</sup>。

分布式电源配置问题主要确定分布式电源的接入位置和容量。文献[12]利用灵敏度分析方法确定 DG 候选位置, 再由进化规划算法确定 DG 具体位置和容量, 可以提高计算速度。配置 DG 也有采用智能算法, 比如粒子群算法<sup>[10]</sup>、改进遗传算法<sup>[14]</sup>和 CLARA 聚类算法<sup>[13]</sup>等。文献[11]所提的锥优化模型转化方法, 可以实现优化模型和潮流问题统一求解和快速计算。

实际配电系统运行中负荷存在不平衡情况, 文献[10]考虑负荷三相不平衡情况下的 DG 优化配置问题。

配置 DG 研究中还有考虑 DG 与无功补偿设备的综合优化<sup>[18]</sup>, DG 与储能设备的综合优化<sup>[16]</sup>。

### 2.1.5 配置滤波装置

配置滤波装置可以消除谐波,从而可以降低损耗。对滤波装置配置的研究可分为两类:一类是改进滤波装置的研究;另一类是配置滤波装置,包括滤波装置参数设计及安装类型、位置和容量寻优的研究。

有关滤波装置改进的研究,主要是对滤波器控制器的改进,例如采用一种新型可调电抗器控制方式<sup>[19]</sup>,也可对控制器提出注入有功的干扰抑制控制策略<sup>[20]</sup>。

对滤波装置配置的研究中,目标函数主要包括装置费用最小<sup>[21-22]</sup>和电压畸变最小<sup>[23]</sup>。配置滤波器采用算法有启发式算法<sup>[22]</sup>、灵敏度分析方法和遗传算法结合使用<sup>[23]</sup>等。

## 2.2 系统运行

### 2.2.1 变压器优化运行

配电变压器的优化运行指通过优化变压器运行方式,实现降低变压器损耗的目的<sup>[3]</sup>。配变优化研究一般包括变压器本身运行在经济区间和变压器之间的经济运行。例如,文献[24]通过设计有载调容变压器的运行策略,实现变压器在带负载运行过程容量的自动调整,使得变压器运行在经济区间内。文献[25]以有功电量损耗最小为目标,建立地区电网多时段变压器经济运行方式优化模型,实现地区电网变压器运行方式的整体优化。

### 2.2.2 无功优化运行

无功优化运行是在满足系统运行约束条件的基础上,通过确定现有无功补偿设备投入量和变压器分接头位置等,实现降损并提高电压合格率的目的<sup>[26]</sup>。

无功优化运行研究可分为静态和动态无功优化两类<sup>[27]</sup>。

静态无功优化通常指针对系统某一时刻的运行方式进行无功优化,考虑电压等约束以降损为目标<sup>[27-28]</sup>。

动态无功优化指一段时间内的无功优化,需要考虑这段时间设备动作次数的约束,以获得整个周期内电能损失最小的全时段无功调度模式<sup>[27]</sup>。因为考虑设备操作次数约束,所以设备操作费用也常计入目标函数中<sup>[26]</sup>。

由于负荷是实时变化的,文献[26]采用 Fisher 有序聚类算法对负荷曲线进行分段,再利用改进遗传算法和准动态规划法的两层优化算法实现多时段的协调优化。

采用的优化算法主要有启发式算法和各种智能算法,如混合启发式搜索算法<sup>[27]</sup>和改进遗传算法<sup>[26]</sup>。

实际配电系统中负荷是三相不平衡的,在无功

优化时需要考虑负荷三相不平衡情况。文献[28]根据实际情况建立多相模型,能够反映实际配网的不平衡性,计算损耗更精确,所进行的无功优化控制更符合实际。

### 2.2.3 配网重构

配电网重构是指通过改变开关状态优化电网运行结构达到降损和均衡负荷等目的<sup>[29]</sup>。本文讨论的是在正常运行情况下的网络重构。

配网重构一般可分为静态重构和动态重构<sup>[30-31]</sup>。静态重构只是基于某一时间断面的负荷数据进行优化。动态重构则是考虑多个连续时段内负荷波动和开关动作次数约束进行优化,更加符合实际情况<sup>[30]</sup>。

静态重构一般以降损为目标<sup>[3,32-34]</sup>,也有考虑以降损和负荷均衡为目标<sup>[35]</sup>。动态重构是基于时间区间的重构,通常以一段时间能量损耗最小为目标<sup>[29]</sup>。

配网重构的约束条件包括辐射状结构约束、运行约束和资源约束。对于动态重构还包括开关操作约束<sup>[29-31]</sup>。

配网重构常用的算法为启发式算法和人工智能算法<sup>[3]</sup>。文献[32]提出的改进支路法减少网络拓扑调整次数,提高处理效率。且所提算法考虑并非所有配网支路都安装开关,更符合实际。文献[34]所提基于馈线偶的快速降损重构法,避免多次潮流计算,经大规模配网系统验证,满足在线重构应用要求。文献[33]提出的快速支路交换算法避免使用启发式规则,提高计算准确性,且重构过程不用进行潮流计算,显著提高了重构效率。这些研究针对的是没有考虑开关操作约束的静态重构。

对于基于时间区间内的动态重构,由于负荷在实时变化,通常先将时间区间进行时段划分,再利用静态重构对每个时段进行优化。文献[30]采用功率矩法完成时段动态划分,控制开关次数。再利用以静态重构确定开关动作方案为第一层,考虑开关约束确定最优方案为第二层的分层优化求解。文献[29]提出基于时间区间的动态重构算法,先评估开关操作在整个时间区间内的降损效果,再按照合理的启发式规则确定开关操作顺序,形成优化方案。文献[31]以整个周期内网损最小和开关操作次数最小为综合优化目标,通过一种新型的复合型微分进化多目标优化算法求解,完成全时段的动态重构。

### 2.2.4 平衡三相负荷

平衡三相负荷的研究主要从两个方面考虑:一是安装无功补偿装置,补偿无功的同时可以平衡三相负荷;二是通过对三相负荷进行调整和换相,解决三相负荷不平衡问题。

常用的平衡三相负荷的无功补偿装置有电容器

组、静止同步补偿器<sup>[36]</sup>和静态无功补偿器<sup>[37]</sup>等。平衡三相负荷的无功补偿研究中, 可以采用新的正、负序补偿电流叠加补偿控制方法, 通过 STATCOM 补偿三相负荷不平衡产生的负序电流, 平衡电网侧三相负荷<sup>[36]</sup>。也有采用不平衡负载的平衡分量法, 快速准确地计算出三相并联补偿导纳值, 通过 SVC 补偿平衡负载<sup>[37]</sup>。

对于调整负荷实现平衡三相负荷的研究, 文献[38]提出负荷在线自动换相的方法, 完成实时在线治理三相负荷不平衡问题。

### 3 组合措施

前面讨论通过某一措施实现降损, 然而很多措施之间相互影响, 如果配合使用得当, 可以达到更好的降损效果。本节讨论最常用的无功优化、配网重构和分布式电源优化之间的组合优化问题。

#### 3.1 无功优化与配网重构

无功优化包括配置无功优化与无功运行优化, 同配网重构配合实现降损的研究中, 只考虑了配置无功补偿装置优化与配网重构同时实施的情况。且电容器配置和重构存在内在耦合, 同时优化效果优于单独优化<sup>[39]</sup>。

通常以降损为目标, 考虑投资成本的话, 也将电容器配置费用最小计入目标函数中<sup>[39-40]</sup>。实际配电网系统存在非线性负荷, 文献[39]在目标函数中考虑谐波畸变最小, 更符合实际, 并对多目标赋予权值转为单目标函数进行优化。常采用的优化算法有遗传算法<sup>[40]</sup>和粒子群算法<sup>[39]</sup>等。

文献[40]考虑不同负荷条件下进行无功优化配置和重构, 更加符合实际情况。

#### 3.2 无功优化与分布式电源优化

无功补偿优化与分布式电源优化问题, 包括配置优化和运行优化两类。

目标函数常为网损最小<sup>[41-42]</sup>, 配置优化常将投资费用计入目标函数<sup>[18]</sup>。运行优化可分为静态优化和动态优化。动态优化是根据 DG 出力和负荷预测结果进行的实时优化, 不确定性因素较大, 为减少电压越限概率且使无功调度有足够调节裕度, 常将抑制电压波动也作为目标<sup>[41,43]</sup>。

动态优化需考虑设备动作次数约束, 因各控制设备动作间的相互影响, 造成无功优化调度的时空耦合问题<sup>[44]</sup>。文献[44]通过制定电容器预动作时刻表实现时间解耦, 再利用动态分区实现空间解耦。文献[45]将实时无功优化与配网动态分区、短期无功调度相互配合实现时间和空间解耦, 计算速度快且优化效果好。

对于分布式电源和负荷的不确定性及波动性问题, 可以采用蒙特卡洛模拟 DG 随机性<sup>[18]</sup>或者建立负荷和 DG 的不确定模型<sup>[41]</sup>。文献[45]将实时无功优化与短期无功调度配合, 降低负荷预测和 DG 出力预测的不确定性。

实际配网中存在三相负荷不平衡现象, 文献[46]配置 DG 和无功补偿装置研究中, 考虑三相不平衡情况。文献[47]建立三相多时段优化模型, 用于处理三相负荷不平衡情况, 且将储能装置也计入优化变量, 考虑储能和电容器在不同时间断面间的操作约束, 实现降损目的。

在电力市场应用中, DG 和无功补偿装置的最优配置可以减少网络拥堵和降损, 进而影响边际价格<sup>[48]</sup>。

#### 3.3 配网重构与分布式电源优化

配网重构与 DG 优化问题可分为配置 DG 与重构的综合规划优化和 DG 接入功率与重构的综合运行优化两种。在实现降损效果上, DG 优化与重构的同时优化效果优于先重构后优化 DG 或先优化 DG 后重构的效果<sup>[49]</sup>。能与重构进行综合运行优化的 DG 为可调度 DG, 比如燃气轮机、内燃机和部分水轮机。

由于分布式电源出力的随机性和间歇性, 文献[50]在对配置 DG 和重构综合优化前, 建立基于威布尔统计规律的风电的概率模型。考虑实际负荷在实时变化, 文献[51]在不同负荷水平下进行了重构和 DG 配置。

根据是否考虑开关操作约束, 重构与 DG 接入功率的综合优化可分为静态优化和动态优化。静态优化是根据当前负荷进行优化。动态优化则是一段时间内的最优运行, 需要先将时段划分为多个间隔, 再利用静态优化对每个间隔进行优化。文献[3]将 1 天等分为 24 个时间间隔, 在开关动作次数约束下对所有静态优化方案进行合并。

重构与 DG 优化的综合优化研究中没有根据负荷随机性建立负荷不确定模型; 也没有考虑储能电源的影响。文献[50]在对可控 DG 和开关的协同规划时, 考虑负荷需求侧响应的影响。下一步研究考虑将负荷需求侧响应参与与重构和 DG 优化的综合优化中, 达到更好的降损效果。

#### 3.4 无功优化、配网重构和分布式电源优化

无功优化、配网重构和 DG 优化的综合优化的问题, 如果各项优化策略配合得当, 在降损效果上优于单一措施和上述其他的组合优化。

当前研究主要以网损最小为目标<sup>[4,52-53]</sup>。传统降损的无功优化中只考虑网络损耗, 没有考虑变压器

损耗,文献[4]将变压器损耗计入总运行损耗最小的目标函数中,更贴合实际。

对于综合优化模型的非凸非线性难求解问题,可采用二阶锥松弛技术和分段线性化法转变为可求解的凸模型<sup>[52]</sup>。而对于模型求解方法中计算精度和效率难以协调的问题,文献[53]通过对少环网连支上所串联的理想电压源进行优化及对网络的近似等效变换,实现重构、DG 出力和电容器投切三者的同时高效优化又提高了计算精度,适于用大规模配网优化。

文献[52]建立三相优化模型,但没考虑三相负荷不平衡情况。以上综合优化研究属于静态优化问题,均没有计入设备动作次数限制,下一步需考虑动态优化的研究。同时储能装置、需求侧响应及谐波的影响也没有考虑。

## 4 结论

### 4.1 总结

本文先从系统运行和设备角度分别论述了各类降损措施的研究现状。然后阐述了最常用的无功优化、DG 调度优化和配网重构之间的组合优化问题的研究现状。现对上述降损措施研究现状中普遍存在的问题进行总结。

1) 对于负荷不确定问题,无功配置优化、重构与 DG 优化的组合优化以及配网重构、无功优化和 DG 优化的综合优化在降损过程没有建立描述负荷不确定性的模型。

2) 实际配网运行存在三相负荷不平衡情况,配网重构、配网重构同无功优化或 DG 优化的组合优化都没有在降损过程中考虑三相负荷不平衡情况。

3) 对于实际配网中谐波因素的影响,无功优化、DG 优化、配网重构以及三者之间的组合优化,降损措施也都没有考虑。

4) 配网重构、无功补偿和 DG 优化的综合优化没有考虑开关操作约束,且对于 DG 出力随机性、储能装置和需求侧响应的影响也没有考虑。

5) 配网重构、无功优化和 DG 优化的综合优化没有将规划优化和运行优化结合起来进行考虑。

### 4.2 展望

综合当前配网降损措施研究现状和存在问题,在今后配电网节能降损研究中可以从以下几个方面考虑。

1) 配网重构、无功优化和 DG 优化的综合优化将作为下一步降损的主要研究对象,并计入开关操作约束,同时考虑负荷不确定性和 DG 出力的随机性,以及负荷三相不平衡、谐波因素和储能装置的

影响。需求侧主动负荷作为优化控制量参与综合优化。

2) 同时从规划和运行角度考虑配网重构、无功优化和 DG 优化的综合优化问题,规划配置应基于实际运行调度情况,运行优化又基于规划时的最优配置,两者兼顾可以达到更好的降损效果。

3) 从电力市场角度考虑多种电价机制,一方面通过分时电价和峰谷电价引导用户完成削峰填谷作用,从而实现降损。另一方面利用无功电价激励用户主动参与无功补偿,结合现有无功补偿装置,选择最优无功补偿方案,最终实现降损。

## 参考文献

- [1] 杨文锋,王彬宇,程卓,等.城市中低压配电网降损规划决策方法[J].电网技术,2014,38(9):2598-2604.  
YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium and low-voltage urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604.
- [2] 李鹏,张勇军,谭伟聪,等.长安配网节能降耗潜力评估研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(14):97-104.  
LI Peng, ZHANG Yongjun, TAN Weicong, et al. Study on energy saving potential assessment for Changan distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 97-104.
- [3] 麻秀范.含分布式电源的配电网规划与优化运行研究[D].北京:华北电力大学,2013.  
MA Xiufan. Research on planning and optimal operation of distribution network including decentralized generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [4] 邢海军,程浩忠,张逸.基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J].电网技术,2015,39(6):1504-1510.  
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.
- [5] SRAVAN K R K, DAMODAR REDDY M. Optimal placement of capacitor in distribution networks using fuzzy and SFLA[C] // International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization. IEEE, 2015: 1-5.
- [6] ABDELAZIZ A Y, ALI E S, ELAZIM S M A. Flower pollination algorithm and loss sensitivity factors for optimal sizing and placement of capacitors in radial distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78(2): 207-214.

- [7] RESENER M, HAFFNER S, PEREIRA L A, et al. Mixed-integer LP model for volt/var control and energy losses minimization in distribution systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 140: 895-905.
- [8] KARIMI H, DASHTI R. Comprehensive framework for capacitor placement in distribution networks from the perspective of distribution system management in a restructured environment[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 82: 11-18.
- [9] ABDELAZIZ A Y, ALI E S, ELAZIM S M A. Improved harmony algorithm and power loss index for optimal locations and sizing of capacitors in radial distribution systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 80: 252-263.
- [10] DAHAL S, SALEHFAR H. Impact of distributed generators in the power loss and voltage profile of three phase unbalanced distribution network[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 77: 256-262.
- [11] 赵金利, 于莹莹, 李鹏, 等. 一种基于锥优化的 DG 优化配置快速计算方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(12): 173-179.  
ZHAO Jinli, YU Yingying, LI Peng, et al. A fast determination method of DG capacity in distribution network based on conic programming[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(12): 173-179.
- [12] KHATOD D K, PANT V, SHARMA J. Evolutionary Programming based optimal placement of renewable distributed generators[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 683-695.
- [13] 白晓清, 赵瞻, 鲍海波. 基于 CLARA 算法的考虑时序特性分布式电源规划[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(5): 14-22.  
BAI Xiaoqing, ZHAO Zhan, BAO Haibo. DG planning based on CLARA algorithm with consideration of timing characteristics[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(5): 14-22.
- [14] 吴晨曦. 风光发电及电动汽车充放电随机性对配电系统的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
WU Chenxi. Investigations on impacts of the randomness of wind/photovoltaic generation and electric vehicles charging/discharging on distribution[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [15] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于机会约束规划和二层规划的配电网广义电源优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(5): 50-58.  
ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of generalized power sources in distribution network based on chance constrained programming and bi-level programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(5): 50-58.
- [16] 白牧可, 唐巍, 谭煌, 等. 基于虚拟分区调度和二层规划的城市配电网光伏-储能优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(5): 141-148.  
BAI Muke, TANG Wei, TAN Huang, et al. Optimal PV-generation & ES configuration based on virtual partition scheduling and bi-level programming for urban distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(5): 141-148.
- [17] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1: 8pp  
DOI 10.1186/s41601-016-0017-x
- [18] PEREIRA B R, COSTA G R M D, CONTRERAS J, et al. Optimal distributed generation and reactive power allocation in electrical distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(3): 975-984.
- [19] 李达义, 杨凯, 孙玉鸿, 等. 一种新型串联混合型有源电力滤波器[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(6): 82-87.  
LI Dayi, YANG Kai, SUN Yuhong, et al. A novel series hybrid active power filter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(6): 82-87.
- [20] RAMOS FUENTES G A, CORTÉS-ROMERO J A, ZOU Z X, et al. Power active filter control based on a resonant disturbance observer[J]. *IET Power Electronics*, 2015, 8(4): 554-564.
- [21] 赵勇, 邓红英, 李建华, 等. 基于机会约束规划的配电网滤波装置优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(1): 12-17.  
ZHAO Yong, DENG Hongying, LI Jianhua, et al. Chance-constrained programming based optimal allocation of harmonic filters on a distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(1): 12-17.
- [22] BELCHIOR F N, LIMA L R D, RIBEIRO P F, et al. A novel approach towards passive filter placement[C] // *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015: 1-5.
- [23] CHANG G W, WANG H L, CHU S Y. Strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(3): 1204-1211.
- [24] 范闻博, 韩筛根. 有载调容变压器安全经济运行控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(18): 98-102.  
FAN Wenbo, HAN Shaigen. A control strategy for secure and economic operation of on-load capacity regulating transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(18): 98-102.
- [25] 张旭明, 张焰, 汪宇霆, 等. 用禁忌搜索算法的多时段

- 变压器经济运行方式优化[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 109-113.  
ZHANG Xuming, ZHANG Yan, WANG Yuting, et al. Optimization of multi-time interval economic operation for power transformer with Tabu search algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 109-113.
- [26] 胡晓阳, 王卫平, 王主丁, 等. 一种实用的配电网无功运行两层优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 14-21.  
HU Xiaoyang, WANG Weiping, WANG Zhuding, et al. A practical two-phase optimization method of dynamic var optimization in a distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 14-21.
- [27] 王卫平, 王主丁, 张昀, 等. 含分布式电源的配网无功优化混合算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 93-100.  
WANG Weiping, WANG Zhuding, ZHANG Yun, et al. Hybrid algorithm for reactive power optimization in distribution networks with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 93-100.
- [28] YANG F, LI Z. Improve distribution system energy efficiency with coordinated reactive power control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(4): 2518-2525.
- [29] 刘蔚, 韩祯祥. 基于时间区间的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 33-38.  
LIU Wei, HAN Zhenxiang. Distribution system reconfiguration based on time interval[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 33-38.
- [30] 江东林, 刘天琪, 李樊. 采用时段动态划分和分层优化策略的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 153-157.  
JIANG Donglin, LIU Tianqi, LI Fan. Dynamic distribution network reconfiguration based on dynamic partition of time intervals and hierarchical optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 153-157.
- [31] 孙惠娟, 彭春华, 袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 41-46.  
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YUAN Yisheng. Multiobjective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 41-46.
- [32] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.  
BI Pengxiang, LIU Jian, ZHANG Wenyuan. A refined branch-exchange algorithm for distribution networks reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [33] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.  
ZHANG Dong, ZHANG Liuchun, FU Zhengcai. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85.
- [34] 黄伟, 纪双全. 基于馈线偶的配电网快速减小网损重构方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 75-80.  
HUANG Wei, JI Shuangquan. A distribution network reconfiguration method via rapid network loss reduction based on dual feeders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 75-80.
- [35] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 以降损和载荷均衡为目标地区配电网网络重构快速算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 172-178.  
JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Regional network reconfiguration algorithm for loss reduction and loading equilibrium[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 172-178.
- [36] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.  
XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.
- [37] 胡应宏, 王建曠, 任佳佳, 等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 98-104.  
HU Yinghong, WANG Jianze, REN Jiajia, et al. Balance component decomposition and compensation method for unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 98-104.
- [38] 方恒福, 盛万兴, 王金丽, 等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2185-2193.  
FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [39] SAYADI F, ESMAEILI S, KEYNIA F. Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(10): 2316-2326.
- [40] FARAHANI V, VAHIDI B, ABYANEH H A. Reconfiguration and capacitor placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method[J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2012, 27(2): 587-595.
- [41] CHEN T, LAVROVA O, LEHR J. The optimal planning and dynamic operation of distributed generation method based on modified multiobjective optimization in power distribution system[C] // Green Energy and Systems Conference: IEEE, 2015: 70-78.
- [42] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.  
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [43] 谭煌, 张璐, 丛鹏伟, 等. 计及分布式电源与电容器协调的配电网日前无功计划[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2590-2597.  
TAN Huang, ZHANG Lu, CONG Pengwei, et al. Day-ahead reactive power scheduling for distribution network considering coordination of distributed generation with capacitors[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2590-2597.
- [44] 刘公博, 颜文涛, 张文斌, 等. 含分布式电源的配电网动态无功优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 49-54.  
LIU Gongbo, YAN Wentao, ZHANG Wenbin, et al. Optimization and dispatching method of dynamic reactive power in distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 49-54.
- [45] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含 DG 配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124.  
ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.
- [46] JUANUWATTANAKUL P, MASOUM M A S. Increasing distributed generation penetration in multiphase distribution networks considering grid losses, maximum loading factor and bus voltage limits[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(12): 1262-1271.
- [47] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.  
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [48] GUGULOTH R, KUMAR T K S. LMP calculation and OPF based congestion management in deregulated power systems[J]. International Journal on Electrical Engineering & Informatics, 2016, 8(2): 303-314.
- [49] 赵晶晶, 李新, 彭怡, 等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 162-166.  
ZHAO Jingjing, LI Xin, PENG Yi, et al. A comprehensive optimization algorithm for injection power of distributed generation and distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 162-166.
- [50] 吕冰. 分布式电源和开关的协调规划方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LÜ Bing. Coordinated allocation of distributed generation and controllable switches in distribution systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [51] RAO R S, RAVINDRA K, SATISH K, et al. Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 317-325.
- [52] TIAN Z, WU W, ZHANG B, et al. Mixed-integer second-order cone programming model for VAR optimization and network reconfiguration in active distribution networks[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(8): 1938-1946.
- [53] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433.  
WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-12-09

作者简介:

应丽云(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 953702537@qq.com

刘敏(1972—), 女, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力投资规划、电力市场、风险管理和智能电网等。E-mail: minliu666@qq.com

(编辑 魏小丽)