

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191185

基于交替方向乘子法及最优潮流的输配电网协调规划方法

徐小琴¹, 王博¹, 赵红生¹, 杜治¹, 杨东俊¹, 李高俊杰², 刘军³, 胡钊²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 3. 国网湖南电力有限公司娄底供电公司, 湖南 娄底 417000)

摘要: 输配电网间的交互愈加紧密, 因此在规划中考虑两者间的协调关系是十分必要的。对此, 提出了一种基于交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)及最优潮流(OPF)的输配电网协调规划方法。该方法首先通过计及网络最优潮流, 以输配电网连结处的传输功率作为耦合变量建立输配电网协调规划模型, 并将耦合变量作为共享变量, 利用 ADMM 算法求解模型得到电网规划初步方案。然后提出划分子算法对配电网侧规划初步方案中的各变电站所带供电网络进行独立划分得到配电网侧规划最终方案, 据此优化输电侧规划初步方案。最后将两侧电网规划最终方案加以整合。通过对 IEEE-14 节点输电网与 54 节点配电网的耦合系统进行仿真分析, 并对比不考虑输配电网协调关系时的电网规划方案, 验证了该方法的合理性和有效性。

关键词: 输电网规划; 配电网规划; 协调规划; 交替方向乘子法; 最优潮流

Coordination planning method of a transmission and distribution network based on alternating direction method of multipliers and optimal power flow

XU Xiaoqin¹, WANG Bo¹, ZHAO Hongsheng¹, DU Zhi¹, YANG Dongjun¹, LIGAO Junjie², LIU Jun³, HU Po²

(1. State Grid HBEPC. Ltd Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Loudi Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Company, Loudi 417000, China)

Abstract: The interaction between transmission and distribution networks is increasingly important, so it is necessary to consider the coordination between them in planning. In this paper, a coordinated planning method of a transmission and distribution network based on an Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM) and optimal power flow (OPF) is proposed. In this method, the OPF of the network is taken into account, the transmission power at the connection of the transmission and distribution network is taken as the coupling variable to establish the coordination planning model, and the coupling variable is taken as the shared variable. Then, a sub-algorithm is proposed to independently divide the power supply network of each substation in the preliminary scheme of the distribution network side planning and obtain the final scheme, so as to optimize the preliminary scheme. Finally, the final planning scheme of the two sides is integrated. Through the simulation analysis of the coupling system between the IEEE-14 bus system and the 54-node distribution network, and the comparison of the network planning scheme without considering the coordination of transmission and distribution network, the rationality and effectiveness of the method in this paper are verified.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: transmission network planning; distribution network planning; coordinated planning; alternating direction method of multipliers; optimal power flow

0 引言

输电网与配电网是电力系统的两个重要组成部

分, 其规划内容包括确定何时、何地投建何种规模与类型的线路^[1-2], 以及确定变电站的布局与规模^[3-4]等。同时, 在当前智能电网的背景下, 分布式电源与储能的加入使得规划内容更加丰富^[5-8]。合理的电网规划方案能够有效提高电力系统运行的经济性和可靠性, 保证电能质量以及减少投资、运行和维护等费

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目资助(2015AA050101)

用。随着智能电网的不断发展完善, 输配电网间的交互愈加紧密, 相互作用愈加明显^[9-10], 在进行电网规划时有必要充分考虑两者间的协调关系, 以寻求实现整体最优的规划方案。

目前电网规划领域已经取得了许多研究成果, 输电网规划方面的研究成果有: 文献[11]在输电网规划时引入表征电网中线路负载率分布情况的指标, 在最小化投资与网损的同时兼顾电网负载均衡度; 文献[12]在电网运行非均匀性的基础上考虑电网扩建成本和线路损耗, 构建了多目标输电网规划模型, 并利用改进遗传算法进行求解; 文献[13]与文献[14]针对输电网规划模型变量多、维数高、约束条件复杂等问题, 分别提出了改进 TOPSIS 法与德尔菲熵权综合权重法的规划方法和改进量子遗传算法的规划方法对模型进行求解; 文献[15]提出了一种输电网中长期规划的混合性规划模型, 该模型计及了规划时的确定性和概率性准则, 以寻求更为合理有效的规划方案; 文献[1,16]针对高比例可再生能源并网与智能电网快速发展背景下输电网规划时存在不确定因素的问题, 分别讨论了基于不确定理论和鲁棒优化的输电网规划方法。配电网规划方面的成果有: 文献[17]针对市场环境下变电站选址定容问题, 提出了基于设备全寿命周期成本的规划模型; 文献[18]以投资运行成本最小为目标, 考虑网络的辐射性和连通性等约束以及多个变电站供电的情况, 建立了配电网网架规划的混合整数线性规划模型, 并引入埃米尔特矩阵和辅助松弛变量将模型转化为二阶锥模型求解; 文献[19]在规划模型中加入切负荷成本和电压稳定裕度约束, 通过降低风险来降低总成本; 文献[20]计及线路能量损耗和供电不足期望成本, 利用动态规划方法来确定各阶段变电站和线路规划方案; 文献[21]在大量分布式电源接入的市场环境下, 考虑多利益主体的不同利益需求, 构建了双层规划的配电网规划模型并通过飞行杜鹃算法进行求解; 文献[2]中讨论了负荷需求和负荷位置不确定性以及分布式电源接入不确定性等情况下的配电网规划模型及求解方法。

上述研究成果为当前输配电网规划模型的建立与求解提供了参考。显然可见, 这些研究均仅针对输电网或配电网的独立规划问题, 并未考虑到输电网和配电网两者间的协调关系, 因此容易出现电网实际运行时由于规划运行边界条件不统一, 致使规划结果无法充分发挥作用, 出现电网运行经济性较差等问题, 即无法达到预期的规划运行效果。例如, 配电网的负荷配置变化会影响上层输电网的潮流分布, 进而影响输电网的供电可靠性; 输电网的结构

变化会影响下层配电网的负荷优化配置与负荷转供方案^[22]。因此, 在进行输电网或配电网规划时, 考虑输配电网间的协调关系是十分必要的。但是, 目前针对输配电网协调规划问题的研究成果较少, 文献[22]在输电网规划时引入了配电网转供约束, 在配电网规划时引入了输电网 $N-2$ 转供约束, 以及两者的可靠性约束和线路平均负载率约束等, 并利用自适应搜索离散萤火虫算法进行了求解, 然而该方法在求解较大规模的输配电网协调规划问题时, 需要考虑大量的负荷转供和线路增减情况, 故而求解效率低且不易收敛。由此可见, 传统的集中式求解方法在求解大规模优化问题时存在一定的局限性。

随着分布式计算方法的兴起与不断发展, 其在求解大规模优化问题时的优势逐渐显现。ADMM 算法作为一种分布式算法, 由于其形式简单、收敛性好和鲁棒性强, 以及不要求子优化目标函数严格凸^[23-24], 因此在求解大规模多网络协同优化问题中得到了广泛应用^[25-26]。该方法将大规模优化问题转化为两个或多个小规模子优化问题进行求解, 能够有效降低待求问题的规模和复杂度, 相较于集中式求解方法更为简单高效。

鉴于此, 本文提出了一种基于 ADMM 算法及最优潮流的输配电网协调规划方法。首先将输电网规划和配电网规划作为两个规划子问题, 并选取输配电网连结处的传输功率作为耦合变量将两个子问题关联, 同时在规划时计及网络最优潮流, 由此建立基于最优潮流的输配电网协调规划模型。然后以耦合变量作为共享变量实现子问题间的通信, 利用 ADMM 算法对所建模型进行求解, 得到各变电站所带供电网络间相互连通的电网规划初步方案。再者提出划分子算法对配电网侧规划初步方案中的各变电站所带供电网络进行独立划分。最后利用经独立划分后的配电网侧规划方案对输电网侧规划初步方案进行优化, 得到最终的输配电网协调规划方案。以 IEEE-14 节点输电网与 54 节点配电网耦合系统进行仿真计算, 并对比不考虑输配电网协调关系时计算得到的输电网与配电网规划方案, 验证本文所提方法的合理性和有效性。

1 基于最优潮流的输配电网协调规划模型

1.1 输配电网协调关系

输电网与配电网是相互影响的上下层关系: 下层配电网的规划方案会影响上层输电网的潮流分布, 间接影响输电网的优化调度及可靠性; 上层输电网的规划方案会影响其供电可靠性, 间接影响下层配电网的安全稳定运行。这种上下层关系即为本

文所考虑的输电网协调关系。

为了在上述协调关系下有效耦合输配电网，可将两者连结处的传输功率作为耦合变量，该变量在输电网侧和配电网侧分别为连结处节点的等效负荷和等效电源。进而在电网规划时计及两网的潮流优化，即可将输配电网中线路的建设与否作为优化变量置于最优潮流问题中加以考虑^[27]。

本文所考虑的应用场景为：在现有输电网网架结构的基础上，由于负荷增长，需要对输电网的下层配电网进行线路规划。规划时由于须计及两网的协调性并保证配电网建成投运后输电网的安全稳定运行，输电网中会相应新增少量线路或新建变电站。

1.2 输电网规划模型

传统的电网规划模型一般为多目标规划模型，目标函数包括电网新增线路投资成本和电网运行成本^[28-29]等，本文以输电线路投资年折算成本和年运行成本作为优化目标函数，网络潮流以直流潮流模型进行计算。此外，本文仅考虑最终水平年的规划方案，所建立的电网规划模型为静态电网规划模型，即

目标函数为

$$\min C_T = \zeta(a_T P_T^2 + b_T P_T + c_T) + C_{Tl} \quad (1)$$

式中：下标 T 代表输电网； a_T 、 b_T 和 c_T 均为发电机组出力成本系数行向量； C_{Tl} 为规划投资成本； ζ 为等年值运行成本与等年值投资成本的等效因子。

规划线路的投资成本 C_{Tl} 可表示为

$$C_{Tl} = \sum_{(i,j) \in TL} \alpha c_{ij}^T I_{ij} \quad (2)$$

式中： TL 为输电网中线路 $i-j$ 的集合； c_{ij}^T 为输电网节点 i, j 间线路的建设费用； I_{ij} 表示线路是否建设的布尔变量，其值为 1 时代表投建，否则为不建设， α 为线路资金回收系数，表示为

$$\alpha = \frac{z(1+z)^Y}{(1+z)^Y - 1} \quad (3)$$

式中： Y 为线路预计运行寿命年数，即线路回收周期； z 为资金折现率。

$$B_T \theta_T = P_{TZ} \quad (4)$$

$$PL_{T,ij} = \frac{(\theta_{Ti} - \theta_{Tj}) \cdot (n_{T,ij}^0 + n_{T,ij})}{x_{T,ij}}, n_{T,ij} \in \{0,1\} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{ND_T} D_{Ti} = L_D \quad (6)$$

$$|PL_{T,ij}| \leq (n_{T,ij}^0 + n_{T,ij}) \cdot PL_{T,ij}^{\max}, (i,j) \in TL \quad (7)$$

$$P_{Ti}^{\min} \leq P_{Ti} \leq P_{Ti}^{\max}, i=1,2,L, N_{TG} \quad (8)$$

$$\theta_{Ti}^{\min} \leq \theta_{Ti} \leq \theta_{Ti}^{\max}, i=1,2,L, N_T \quad (9)$$

$$C_{Tnew}^{\min} \leq C_{Tl} \leq C_{Tnew}^{\max} \quad (10)$$

$$\gamma_T^{\min} \leq \frac{1}{NL_T} \cdot \sum_{(i,j) \in TL} \frac{|PL_{T,ij}|}{(n_{T,ij}^0 + n_{T,ij}) \cdot PL_{T,ij}^{\max}} \leq \gamma_T^{\max} \quad (11)$$

$$T_{Ti}^{\min} \leq T_{Ti} \leq T_{Ti}^{\max}, i=1,2,L, NT_T \quad (12)$$

$$D_{Ti}^{\min} \leq D_{Ti} \leq D_{Ti}^{\max}, i=1,2,L, ND_T \quad (13)$$

$$\text{线路 } N-1 \text{ 约束} \quad (14)$$

式中： P_T 为发电机组出力列向量； B_T 为节点导纳矩阵； θ_T 和 P_{TZ} 分别为各节点电压相角和注入功率列向量，三者均不包含平衡节点 s ；线路 $i-j$ 为首端节点为 i 、末端节点为 j 的线路； $x_{T,ij}$ 为线路单位长度电抗； L_D 为下层待规划配电网的负荷总量； $PL_{T,ij}^{\max}$ 为单条线路 $i-j$ 传输有功功率 $PL_{T,ij}$ 的上限值； P_{Ti}^{\max} 和 P_{Ti}^{\min} 分别为第 i 台发电机组出力 P_{Ti} 的上下限值； θ_{Ti}^{\max} 和 θ_{Ti}^{\min} 分别为第 i 个节点处电压相角 θ_{Ti} 的上下限值，其中平衡节点处 $\theta_{Ts} = 0$ ； C_{Tnew}^{\max} 和 C_{Tnew}^{\min} 分别为新增线路投资成本的上下限值； γ_T^{\max} 和 γ_T^{\min} 分别为线路平均负载率合理区间上下边界值； T_{Ti}^{\max} 和 T_{Ti}^{\min} 分别为第 i 台变压器负载率 T_{Ti} 的合理区间上下边界值； D_{Ti}^{\max} 和 D_{Ti}^{\min} 分别为第 i 个下层待规划配电网在输电网侧的等效负荷 D_{Ti} 的上下限值，分别与配电网侧等效电源的上下限值对应； N_T 、 N_{TG} 、 NT_T 、 ND_T 和 NL_T 分别为输电网中的节点数、发电机组台数、变压器个数、所连结的下层配电网个数和新增线路后的线路数。

式(4)为网络潮流约束。式(6)在输电网侧给出了下层待规划配电网的总负荷需求。式(7)为新增线路后节点间传输有功功率约束。式(8)为各台发电机组出力约束。式(9)为各节点电压相角约束。式(10)将新增线路投资成本以区间的形式作为约束条件，合理调整区间上下限可优化模型求解结果。式(11)和式(12)使得在对规划模型进行求解时，能够兼顾网络整体的线路平均负载率和各台变压器的负载率，保证网络潮流的均衡分布并使得各台变压器能够运行在合理区间，提高输电网运行的可靠性。引入约束式(13)使得求解规划模型时能够考虑到下层待规划各配电网规模对上层输电网潮流分布的影响，合理调整待规划各配电网规模能够有效改善输电网运行时的潮流分布情况，使其运行更为安全稳定。式(14)为线路 $N-1$ 约束，进一步完善电网规划结果。

1.3 配电网规划模型

本文所考虑的是多变电站供电情况下配电网中新增负荷分配、变电站新建和新增线路规划问题，

如图 1 所示^[30], 实线和虚线分别表示已建线路和可建线路, S1 和 S2 为已建变电站, S3 和 S4 为可建变电站。对于该问题, 传统解决方法是建立以线路投资成本为目标函数的混合整数规划模型, 并引入连通性或辐射状等约束来求解^[2,28]。由于这里是在最优潮流下对整个配电网结构建模求解, 故而在进行配电网规划时暂不将各变电站独立, 即规划求解时各变电站所带供电网络间是彼此连通的, 无孤立节点。为了便于后续独立划分配电网侧供电网络, 此处网络潮流选用直流潮流模型, 忽略线路网损。此外, 本文不考虑待建变电站的建设成本, 而是考虑其建成后投入运行的成本, 该成本按等效电源出力成本进行计算。由此, 本文建立以配电网侧等效电源出力成本和年折算线路投资成本为目标函数的模型, 即

目标函数

$$\min C_D = \zeta(a_D P_D^2 + b_D P_D + c_D) + C_{Dl} \quad (15)$$

式中: 下标 D 代表配电网; a_D 、 b_D 和 c_D 均为等效发电机组出力成本系数行向量; C_{Dl} 为规划线路投资成本。

配电网规划线路的投资成本 C_{Dl} 可表示为

$$C_{Dl} = \sum_{(i,j) \in DL} \alpha c_{ij}^T I_{ij}$$

式中, DL 为配电网中线路 $i-j$ 的集合。

约束条件

$$B_D \theta_D = P_{DZ} \quad (16)$$

$$PL_{D,ij} = \frac{(\theta_{Di} - \theta_{Dj}) \cdot n_{D,ij}}{x_{D,ij}}, \quad n_{D,ij} \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{Di} = L_D \quad (18)$$

$$|PL_{D,ij}| \leq n_{D,ij} \cdot PL_{D,ij}^{\max}, \quad (i,j) \in DL \quad (19)$$

$$P_{Di}^{\min} \leq P_{Di} \leq P_{Di}^{\max}, \quad i = 1, 2, L, N_{DG} \quad (20)$$

$$\theta_{Di}^{\min} \leq \theta_{Di} \leq \theta_{Di}^{\max}, \quad i = 1, 2, L, N_D \quad (21)$$

$$C_{Dnew}^{\min} \leq C_{Dl} \leq C_{Dnew}^{\max} \quad (22)$$

此模型约束条件所表达的含义与 1.2 节中的输电网规划模型中的约束条件相对应, 此处不再赘述。

式(16)为网络潮流约束。式(17)使得规划时能够顾及所有负荷节点, 避免求解结果中出现孤立负荷节点。式(18)为新增线路的传输有功功率约束。式(19)为各等效电源出力约束。式(20)为各节点电压相角约束。式(21)将新增线路投资成本以区间的形式加以约束, 合理调整区间上下限可有效减少不必要的新增线路, 从而减少配电网规划结果中的弧和环。

式(22)使得模型求解可兼顾网络整体的线路平均负载率, 降低配电网规划结果中出现瓶颈线路的概率, 从而提高配电网运行的可靠性。由于本文所求解的是辐射状单回线结构配电网, 故不考虑 $N-1$ 约束。

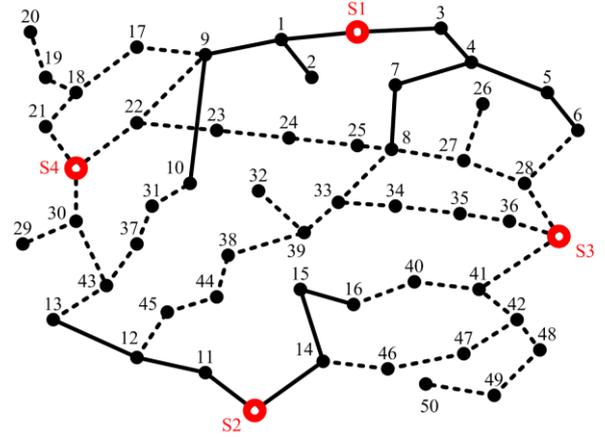


图 1 待规划配电网拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure of distribution network to be planned

2 基于 ADMM 算法的输配电网协同规划模型求解

为避免集中式方法用于大规模问题求解时出现模型复杂和通信量过大等问题, 本文利用 ADMM 算法求解所构建的输配电网协调规划模型。

2.1 分解协调机制

利用 ADMM 算法求解输配电网协调规划模型的机制如图 2 所示。

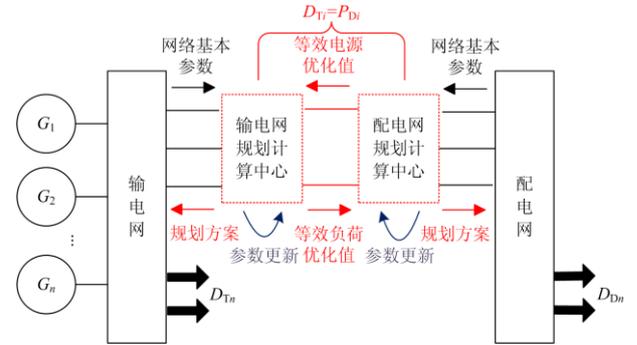


图 2 输配电网协调规划模型求解机制

Fig. 2 Solution mechanism of transmission and distribution network coordination planning model

其中输配电网均有各自的虚拟规划计算中心, 电网会向规划计算中心上传其当前网络参数, 规划计算中心会根据求解结果下发电网的规划方案并更新网络参数。两个网络的规划计算中心会相互传递计算得到的共享变量值, 并将传递过来的共享变量代入模型求解, 更新共享变量值和规划方案。由此

利用共享变量经少量但多次的信息传递和迭代计算实现整个输电网的协调规划模型的求解。相较于集中式方法,该过程中无需输电网与配电网双方互相知晓对方网络的网架结构参数或由第三方机构参与协调计算,降低了计算复杂度。

基于该求解机制,选取输电网连结处的传输功率作为共享变量,该变量在输电网侧为等效负荷 D_T ,在配电网侧则为等效电源 P_D ,式(23)用以表征两网之间的耦合关系,即

$$D_T = P_D \quad (23)$$

2.2 ADMM 算法原理

假设优化问题形式如下:

$$\min f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{z}) \quad (24)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{Ax}_s + \mathbf{Bz}_s = \mathbf{C} \quad (25)$$

式中: $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{z})$ 为目标函数分解成的两个子问题; \mathbf{x} 和 \mathbf{z} 分别为 $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{z})$ 中的变量向量; 式(24)将 $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{z})$ 耦合,其中 \mathbf{x}_s 和 \mathbf{z}_s 分别为 $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{z})$ 中的共享变量向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 为共享变量耦合关系系数矩阵。

利用拉格朗日函数将耦合约束加入目标函数中得到新的目标函数为

$$L_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\alpha}) = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{z}) + \boldsymbol{\alpha}^T (\mathbf{Ax}_s + \mathbf{Bz}_s - \mathbf{C}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Ax}_s + \mathbf{Bz}_s - \mathbf{C}\|_2^2 \quad (26)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}$ 为乘子变量; ρ 为惩罚因子,且为常数。式(26)中耦合约束的存在为子问题的分布式求解提供了基础。

ADMM 算法求解的思想为:先选择一个子问题 $f(\mathbf{x})$ 进行计算,待计算完成后暂停计算并将共享变量的信息传递给另一个子问题 $g(\mathbf{z})$,待 $g(\mathbf{z})$ 计算完成后暂停计算并将共享变量的信息传回 $f(\mathbf{x})$,每完成一轮计算后更新一次乘子变量 $\boldsymbol{\alpha}$ 。该迭代计算过程可以表示为

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{x}} L_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}_s^{(k)}, \boldsymbol{\alpha}^{(k)}) \quad (27)$$

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{z}} L_\rho(\mathbf{x}_s^{(k+1)}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\alpha}^{(k)}) \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\alpha}^{(k+1)} = \boldsymbol{\alpha}^{(k)} + \rho (\mathbf{Ax}_s^{(k+1)} + \mathbf{Bz}_s^{(k+1)} - \mathbf{C}) \quad (29)$$

收敛判据为

$$\|\mathbf{r}^{(k+1)}\|_2 = \|\mathbf{Ax}_s^{(k+1)} + \mathbf{Bz}_s^{(k+1)} - \mathbf{C}\|_2 \leq \varepsilon_{\text{pri}} \quad (30)$$

$$\|\mathbf{s}^{(k+1)}\|_2 = \|\rho \mathbf{A}^T \mathbf{B} (\mathbf{z}_s^{(k+1)} - \mathbf{z}_s^{(k)})\|_2 \leq \varepsilon_{\text{dual}} \quad (31)$$

式中, $\mathbf{r}^{(k+1)}$ 和 $\mathbf{s}^{(k+1)}$ 分别为第 $k+1$ 次迭代后的原始残差和对偶残差,对应的残差容忍上限分别为 ε_{pri} 和 $\varepsilon_{\text{dual}}$ 。

2.3 输电网协同规划模型分布式求解

根据上述 ADMM 算法将输电网协调规划问题分解为输电网规划问题和配电网规划问题两个子问题。每个子问题以各自系统的电源出力成本最低为目标,以共享变量进行通信,实现整个输电网的协调规划求解,得到输电网协调规划初步方案。

输电网规划子问题的目标函数为

$$\min C'_T = \mathbf{a}_T \mathbf{P}_T^2 + \mathbf{b}_T \mathbf{P}_T + \mathbf{c}_T + C_{Tl} + (\boldsymbol{\alpha}^{(k)})^T \cdot (\mathbf{P}_D^{(k)} - \mathbf{D}_T) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{P}_D^{(k)} - \mathbf{D}_T\|_2^2 \quad (32)$$

配电网规划子问题的目标函数为

$$\min C'_D = \mathbf{a}_D \mathbf{P}_D^2 + \mathbf{b}_D \mathbf{P}_D + \mathbf{c}_D + C_{Dl} + (\boldsymbol{\alpha}^{(k)})^T \cdot (\mathbf{P}_D - \mathbf{D}_T^{(k+1)}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{P}_D - \mathbf{D}_T^{(k+1)}\|_2^2 \quad (33)$$

在求解计算时需满足前述所有的网络约束条件。其计算流程如下。

Step1: 参数初始化。设置变量 $\boldsymbol{\alpha}^{(1)}$ 和共享变量初始值 $\mathbf{P}_D^{(1)}$, 设置迭代次数 $k=1$, 给定常数参数 ε_{pri} 、 $\varepsilon_{\text{dual}}$ 和 ρ 值;

Step2: 以式(32)和式(33)作为目标函数,利用式(27)和式(28)进行迭代计算,乘子变量 $\boldsymbol{\alpha}$ 的更新公式为

$$\boldsymbol{\alpha}^{(k+1)} = \boldsymbol{\alpha}^{(k)} + \rho (\mathbf{P}_D^{(k+1)} - \mathbf{D}_T^{(k+1)}) \quad (34)$$

Step3: 根据式(30)和式(31)判断是否收敛,若收敛,则结束计算并输出结果,否则 $k=k+1$,重复 Step2 直至计算结果满足收敛判据。

3 规划方案优化

3.1 配电网侧规划方案优化

在 1.3 节中,配电网规划模型未考虑配电网的连通性约束和辐射状约束,使得第 2 节协调规划求解结果的配电网侧规划方案中各变电站所带供电网络间相互连通。因此,本节提出配电网侧的划分子算法,算法步骤如下。

Step1: 确定各变电站所带供电网络的独立划分顺序。根据输电网协调规划模型经求解后所得到的配电网侧各等效电源的最优出力值 P_D 及式(34),计算各等效电源出力值与其出力下限值差值的绝对值 ΔP_D 并从小到大排序,即独立划分顺序。

$$\Delta P_{Di} = |P_{Di} - P_{Di}^{\min}| \quad (35)$$

ΔP_D 值越小则其对应的变电站所带供电网络与其他供电网络的交换功率越少,相对独立性越强,从而待划分的规划线路越少,适合优先划分。

Step2: 若某一变电站计算得到的 ΔP_D 值满足式

(33), 则可分两种情况讨论:

$$\Delta P_D = 0 \quad (36)$$

1) 若该变电站是待建变电站, 则该变电站无需建设。可在电网规划初步方案中将该变电站及其直接相连的线路删除。

2) 若该变电站为已建变电站, 则其所带供电网络的结构即为原结构, 无需新增线路。可将与该变电站及与该变电站所带原供电网络直接相连的线路删除。

Step3: 若某一变电站计算得到的 ΔP_D 值不满足式(33), 则需划分边界供电线路及相关负荷, 如图3所示。其中实线表示已建线路, 虚线表示求解得到的电网规划初步方案中确定要建设的待建线路。

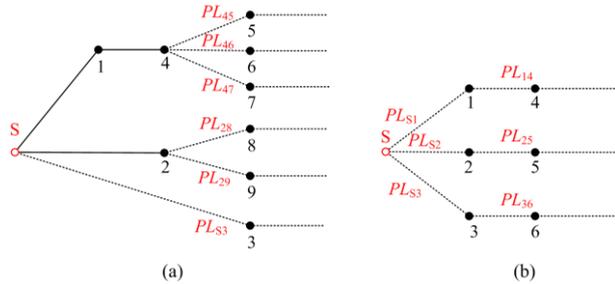


图3 供电网络结构分层示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hierarchical network structure

本文将已建线路与待建线路的交点称为边界节点, 首先根据式(37)计算变电站所带供电网络中各边界节点的外送功率 P_{out} 并剔除值小于 0 的边界节点, 比较剩下各边界节点 P_{out} 值的大小, 从中选出值最大的边界节点并记为 N_{max} 。

$$P_{k,out} = \sum_{l \in OL_k} P_l \quad (37)$$

式中: OL_k 为与边界节点 k 相连且不与其它变电站已建线路相连的待建线路集合; P_l 为待建线路上的传输功率, 功率正方向为以边界节点 k 为起始节点指向线路另一端的方向。 P_{out} 值越小则其所对应的边界节点越独立。然后选出与节点 N_{max} 相连且传输功率值为正的线路中末端节点所带负荷值最接近该变电站 ΔP_D 值且负荷值位于区间 $(0, 2\Delta P_D)$ 的待建线路, 并将其划入该变电站所带供电网络, 若不存在满足该条件的线路, 则将当前变电站所带供电网络独立划分出来即可。接着将新划入线路视为已建线路, 更新边界节点, 重复前述划分方法, 直至不存在满足条件的线路为止。

以图 3(a)情况为例进行说明。选取节点 S、2 和 4 作为边界节点并计算其 P_{out} 值, 假设此时大小顺序为 $P_{4,out} > P_{2,out} > 0 > P_{S,out}$, 则节点 S 后续不再作

为边界节点参与计算, 选取节点 4 所接的待建线路并比较各线路传输功率值, 假设此时线路 4-5 和线路 4-6 的传输功率值 PL_{45} 和 PL_{46} 均为正, 且其末端节点所带负荷值均位于区间 $(0, 2\Delta P_{DS})$, 但节点 5 处负荷值更接近于 ΔP_{DS} , 则将线路 4-5 划入该变电站所带供电网络。接着将线路 4-5 视为已建线路, 选取节点 2、4 和 5 作为边界节点重复前述计算, 直至满足停止条件。图 3(b)为图 3(a)的特殊情况, 可以同理进行独立划分。

按照 Step1 中确定的划分顺序, 利用 Step2 和 Step3 逐个独立划分各变电站所带供电网络即可。最终可得到独立的各变电站所带供电网络以及相应的各等效电源最优出力值。

3.2 输电网侧规划方案优化

配电网侧规划方案经独立划分处理后, 其各等效电源出力值会发生一定的变化, 由于存在耦合关系, 输电网侧等效负荷值也会随之发生变化。虽然变化值不大, 但为了保证输电网侧规划方案的可靠性, 仍需对其进行相关优化。

输电网侧等效负荷值的变化会影响电网规划运行时的潮流分布, 进而影响其运行可靠性。因此, 基于输电网侧规划初步方案中网络基本参数, 利用 1.2 节中输电网规划模型进行求解, 此时无需考虑式(4)和式(11)中约束条件, 求解结果即为优化后的输电网侧规划方案。

整合优化后的输电网侧和配电网侧规划方案即可得到最终的输电网协调规划方案。

4 算例分析

本文利用 Matlab 平台编写 ADMM 算法程序, 调用 YALMIP 工具箱中基于分支界定法的内置求解器 BMIBNB 辅助求解。仿真计算中将图 4 中 IEEE-14 节点输电网与图 1 中 54 节点配电网耦合, 输电网侧节点 10、11、13 和 14 分别与配电网侧 S1、S2、S3 和 S4 连结, 配电网侧网络基本参数取自文献[31]。利用本文所提出的输电网协调规划模型和求解方法对该电网进行规划。此外, 为了更好地说明本文 3.1 节中的划分子算法, 将原配电网侧已建线路 8-33 改为待建线路。在输电网中线路每千米的建设成本为 9.32 万美元, 资金折现率为 10%, 回收周期为 10 年^[32], 在配电网中假设线路建设成本为输电网的一半。

4.1 输电网协调规划初步方案

利用 ADMM 算法对输电网协调规划模型进行求解, 其中基本参数设置为: 乘子变量 $\alpha = [0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]$, 惩罚因子 $\rho = 1$, 残差容

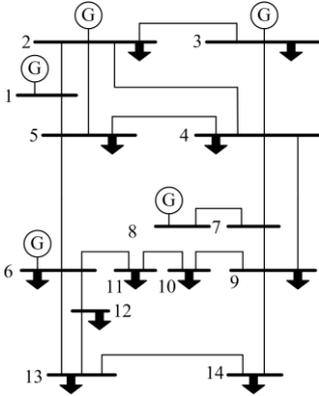


图4 IEEE-14节点输电网拓扑图

Fig. 4 Topology of IEEE-14 bus system

忍上限 $\varepsilon_{pri} = \varepsilon_{dual} = 0.01$ 。

最优潮流计算时输电网侧分别选取节点1和节点S1为平衡节点。由于配电网侧变电站S1和S2有已建供电网络，所以在规划时这两个变电站处的等效电源出力下限为其各自已建供电网络中负荷总和，出力上限为配电网侧负荷总值减去其余变电站已建供电网络中负荷总和，经计算得变电站S1、S2、S3和S4处等效电源出力下限值分别为16.4 MW、6 MW、0 MW和0 MW，出力上限值分别为34.4 MW、24 MW、18 MW和18 MW，从而选取共享变量的初始值为 $P_D^{(1)} = [18 \ 6.8 \ 7.8 \ 7.8]^T$ 。

基于上述参数对输电网的耦合系统进行协调规划，得到初步规划方案如图5和图6所示。红色线段表示新建线路方案，可见在配电网侧规划初步方案中各变电站间是相互连通的。

输电网与配电网两侧的共享变量和新增线路投资成本的最优值如表1所示。输电网与配电网两侧的共享变量收敛曲线如图7所示，图中各条收敛曲线均较为平缓，迭代至第28次时满足收敛判据停止计算。

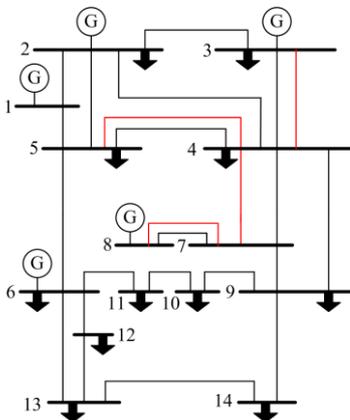


图5 输电网侧规划初步方案

Fig. 5 Preliminary planning scheme of transmission network

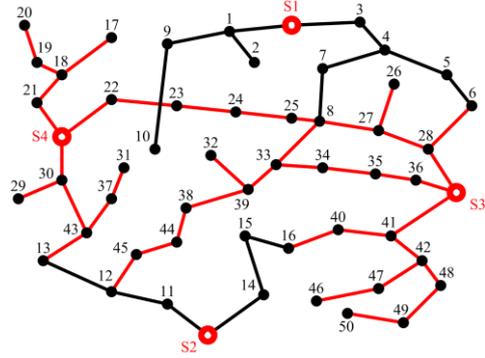


图6 配电网侧规划初步方案

Fig. 6 Preliminary planning scheme of distribution network

表1 输配电网协调规划模型求解结果

Table 1 Results of coordination planning model of transmission and distribution network

	节点编号	共享变量值/MW	运行成本/美元	线路投资成本/美元	总成本/美元
输电网	10	16.61	1.7852×10^7	4.383×10^5	1.829×10^7
	11	7.73			
	13	6.14			
	14	9.92			
配电网	S1	16.61	1.6207×10^7	1.006×10^6	1.7207×10^7
	S2	7.73			
	S3	6.14			
	S4	9.92			

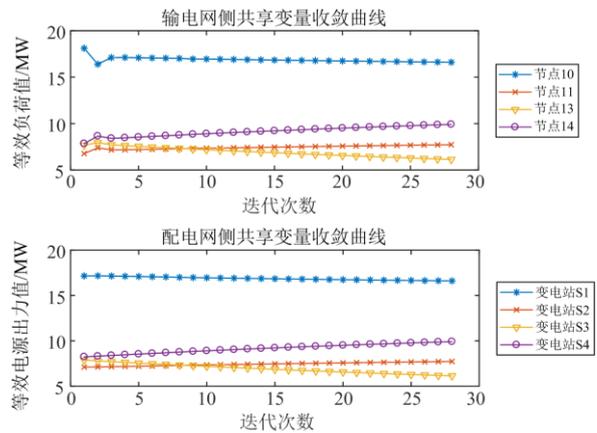


图7 输配电网共享变量收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of transmission and distribution network shared variables

4.2 电网规划初步方案优化

由式(32)计算得到变电站S1、S2、S3和S4处等效电源的 ΔP_D 值分别为0.21 MW、1.73 MW、6.14 MW和9.92 MW，故各变电站所带供电网络的独立划分顺序为S1、S2、S3和S4。

对于变电站 S1, 选择节点 6 和 8 为边界节点, 计算得到其 P_{out} 值分别为 -0.6072 MW 和 0.1194 MW, 故节点 6 可从边界节点中剔除, 仅从与边界节点 8 相连的待建线路中选择新建线路。与边界节点 8 相连的待建线路 8-25、8-27 和 8-33 上的传输功率值分别为 0.3501 MW、 -1.0953 MW 和 0.8646 MW, 故可不选择线路 8-27。此外, 节点 25 和 33 处负荷值分别为 0.6 MW 和 1.8 MW, 均位于区间 $(0, 0.42)$ MW 之外, 故无满足条件的待建线路, 将变电站 S1 所带原供电网络独立划分出来。同理, 按顺序划分其余三个变电站所带供电网络。最终的配电网侧规划方案如图 8 所示, 此时变电站 S1、S2、S3 和 S4 处的等效电源出力值分别为 16.4 MW、 7.8 MW、 6.2 MW 和 10 MW。

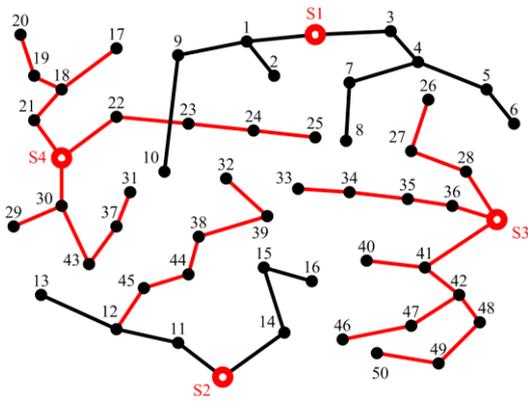


图 8 配电网侧规划最终方案

Fig. 8 Final planning scheme of distribution network

将此时各等效电源出力值作为等效负荷值代入到输电网规划模型中并对模型进行求解, 求解结果显示输电网侧规划初步方案无需改动, 图 5 和图 8 即为最终的输电网协调规划方案。

4.3 对比分析

为了更好地说明本文所提输电网协调规划方法的有效性, 将利用本文方法求解得到的输电网协调规划方案与未考虑输电网协调关系时求解得到的输电网规划方案进行对比分析。

当不考虑输电网协调关系进行规划时, 输电网与配电网各自独立规划, 即规划方案求解过程中上下层电网间无信息传递, 仅考虑自身最优潮流和部分边界条件。如输电网规划时不考虑对下层配电网的影响, 仅计及配电网侧待规划供电网络中的负荷总值, 连结处各节点等效负荷的上下限设置不考虑配电网侧约束, 即 1.2 节输电网规划模型式(11)中的上下限约束设置与 1.3 节配电网规划模型中式(18)无关。配电网规划时不考虑对上层输电网的影响, 仅考虑自身最优潮流。在此情况下, 通过仿真

计算得到输电网和配电网的规划方案分别如图 9 和图 10 所示, 其余求解结果如表 2 所示。

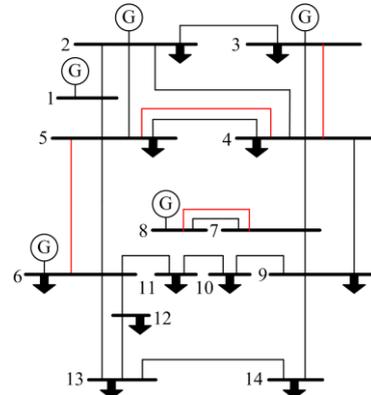


图 9 输电网规划方案

Fig. 9 Planning scheme of transmission network

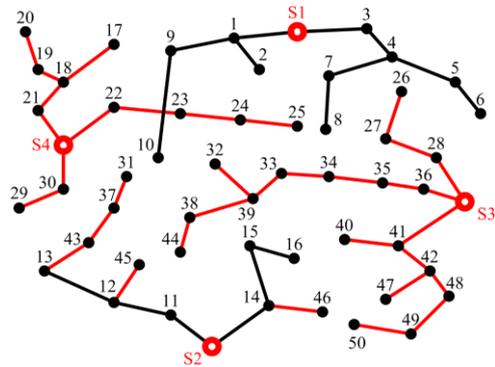


图 10 配电网规划方案

Fig. 10 Planning scheme of distribution network

表 2 输电网和配电网规划模型求解结果

Table 2 Results of planning model of transmission and distribution network

	节点 编号	功率值/ MW	运行成本/ 美元	投资成本/ 美元	总成本/ 美元
输 电 网	10	7.99			
	11	32.14	1.812×10^7	4.383×10^5	605.07
	13	0.27			
	14	0.00			
配 电 网	S1	16.40			
	S2	8.10	1.6207×10^7	8.236×10^5	1.7031×10^7
	S3	7.50			
	S4	8.40			

由表 2 可知, 相较于输电网协调规划求解结果, 输电网与配电网独立规划时, 输电网的运行成本均有所降低, 但投资成本增加, 配电网的运行成本基本没变, 投资成本大幅减少。但是, 由于两者规划时没有交互通信, 仅考虑自身最优, 使得优化结果中两者连结处出现功率不匹配, 即出现了运行

时边界条件不一致的问题, 进而导致该规划方案无法使整个输电网实现较优或最优运行。由此可见, 在输电网规划时, 合理地考虑两者间的协调关系是十分必要的。

5 结论

本文提出了一种基于 ADMM 算法及最优潮流的输电网协调规划方法, 并通过算例仿真和对比分析验证了该方法的合理性和有效性, 得到如下结论:

(1) 通过计及网络最优潮流, 以输电网联结处的传输功率作为耦合变量建立了输电网协调规划模型。该模型能够有效地将输电网联系起来, 使所得出的规划方案更为优化、合理。

(2) 以耦合变量为共享变量并利用 ADMM 算法对模型进行求解, 将大规模输电网规划问题转化为输电网规划和配电网规划两个子问题, 降低了模型的规模和求解复杂度, 且该方法十分契合所建立的输电网协调规划模型。

参考文献

- [1] DEHGHAN S, AMJADY N. Robust transmission and energy storage expansion planning in wind farm-integrated power systems considering transmission switching[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 756-774.
- [2] SHEN X W, SHAHIDEHPOUR M, HAN Y D, et al. Expansion planning of active distribution networks with centralized and distributed energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 126-134.
- [3] 严星, 刘全, 李祥生, 等. 变电站布点规划研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(10): 109-113.
YAN Xing, LIU Quan, LI Xiangsheng, et al. Study on the layout planning of substation[J]. Smart Power, 2018, 46(10): 109-113.
- [4] LI Yanqing, XIE Qing, WANG Ling, et al. Application of cloud theory to optimal planning of substation locating and sizing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 672-677.
- [5] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [6] 张光亚, 赵莉莉, 边小军, 等. 考虑供需互动和分布式电源运行特性的主动配电网网架规划[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 81-87.
ZHANG Guangya, ZHAO Lili, BIAN Xiaojun, et al. Active distribution network grid planning considering supply and demand interaction and distributed power supply operation characteristics[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 81-87.
- [7] 张勇军, 林晓明, 张紫珩, 等. 基于耐受渗透比的 10 kV 配电网分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 49-54.
ZHANG Yongjun, LIN Xiaoming, ZHANG Ziheng, et al. Distributed generation planning of 10 kV distribution network based on tolerant permeability ratio[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 49-54.
- [8] 李滨, 梁宇帆, 祝靖, 等. 一种分布式光伏选线定容的二阶锥规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 113-122.
LI Bin, LIANG Yufan, ZHU Jing, et al. A second-order cone programming method of feeder-selecting and sizing for distributed photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 113-122.
- [9] 丰颖, 贡志皓, 孙景文, 等. 输配协同的配电网态势快速感知方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 37-44.
FENG Ying, YUN Zhihao, SUN Jingwen, et al. Fast situation awareness method for distribution network coordinated with transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 37-44.
- [10] SUN H, GUO Q, ZHANG B, et al. Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1484-1492.
- [11] 吴耀武, 蔡芝菁, 娄素华, 等. 考虑电网负载均衡度的输电网规划模型[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(12): 96-100.
WU Yaowu, CAI Zhijing, LOU Suhua, et al. Transmission network expansion planning model considering network load balance[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(12): 96-100.
- [12] 潘智俊, 张焰, 祝达康, 等. 计及电网运行非均匀性的多目标输电网规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 53-58.
PAN Zhijun, ZHANG Yan, ZHU Dakang, et al. Multi-objective transmission network planning considering grid-operational heterogeneity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 53-58.
- [13] 朱天瞳, 丁坚勇, 郑旭. 基于改进 TOPSIS 法和德尔菲——熵权综合权重法的电网规划方案综合决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 91-99.
ZHU Tiantong, DING Jianyong, ZHENG Xu. Comprehensive decision-making method of power grid planning scheme based on Improved TOPSIS method and Delphi entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 91-99.
- [14] 周建平, 林韩, 温步瀛. 改进量子遗传算法在输电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 90-95.
ZHOU Jianping, LIN Han, WEN Buying. Application of improved quantum genetic algorithm in transmission

- network expansion planning[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(19): 90-95.
- [15] 王一哲, 汤涌, 董朝阳, 等. 应用于输电网中长期规划的混合性规划模型[J]. *电网技术*, 2016, 40(7): 2094-2100.
WANG Yizhe, TANG Yong, DONG Zhaoyang, et al. A hybrid criterion model for transmission system medium and long terms expansion planning[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(7): 2094-2100.
- [16] 张立波, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于不确定理论的输电网规划[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(16): 159-167.
ZHANG Libo, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Transmission network planning approaches based on uncertainty theories[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(16): 159-167.
- [17] 苏海锋, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于 GIS 空间分析与改进粒子群算法的变电站全寿命周期成本规划[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(16): 92-99.
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation life cycle cost planning based on the GIS spatial analysis and improved PSO algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 92-99.
- [18] 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.
- [19] 叶斌, 李万启, 王绪利, 等. 含分布式新能源的配电网风险规划[J]. *电力建设*, 2016, 37(4): 117-123.
YE Bin, LI Wanqi, WANG Xuli, et al. Risk planning of distribution network with distributed new energy[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(4): 117-123.
- [20] JUNIOR B R P, COSSI A M, CONTRERAS J, et al. Multi-objective multistage distribution system planning using Tabu search[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2013, 5(6): 56-66.
- [21] 屈高强, 李荣, 董晓晶, 等. 基于随机机会约束规划的有源配电网多目标规划[J]. *电力建设*, 2015, 36(11): 10-16.
QU Gaoqiang, LI Rong, DONG Xiaojing, et al. Multiple-objective planning of active power distribution network based on random chance constrained programming[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(11): 10-16.
- [22] 叶诚明, 张焰, 华月申. 输配电协调的网架规划方法[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(9): 200-204.
YE Chengming, ZHANG Yan, HUA Yueshen. Electrical network planning method with coordination of transmission and distribution network[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(9): 200-204.
- [23] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2011, 3(1): 1-12.
- [24] DENG W, LAI M J, PENG Z, et al. Parallel multi-block ADMM with $o(1/k)$ convergence[EB/OL]. [2016-05-04].
<https://arxiv.org/abs/1312.3040>.
- [25] 李婷, 叶希, 唐权, 等. 基于交替方向乘法法的源网协同多适应规划[J]. *电力建设*, 2017, 38(11): 105-112.
LI Ting, YE Xi, TANG Quan, et al. Synergistic adaptive planning of generation and transmission using ADMM[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(11): 105-112.
- [26] WEN Yunfeng, QU Xiaobin, LI Wenyuan, et al. Synergistic operation of electricity and natural gas networks via ADMM[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(9): 4555-4565.
- [27] BACHER R, GLAVITSCH H. Loss reduction by network switching[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1988, 3(2): 447-454.
- [28] 盛四清, 范林涛, 李兴, 等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(15): 51-57.
SHENG Siqing, FAN Lintao, LI Xing, et al. Multi-objective planning of distribution network based on Pareto optimality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(15): 51-57.
- [29] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5): 1038-1054.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Yueying, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5): 1038-1054.
- [30] MIRANDA V, RANITO J V. Genetic algorithms in optimal multi-stage distribution network planning[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 11(9): 1927-1933.
- [31] 汤红卫. 基于 GIS 的农村电网规划方法的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
TANG Hongwei. Research on rural power grid planning method based on GIS[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001.
- [32] SUN Mingyang, CREMER J, STRBAC G. A novel data-driven scenario generation framework for transmission expansion planning with high renewable energy penetration[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 546-555.

收稿日期: 2019-09-27; 修回日期: 2019-10-21

作者简介:

徐小琴(1987—), 女, 硕士, 工程师, 长期从事电力负荷分析与电网规划等方面的研究工作; E-mail: xuxiaoqin8722@163.com

王 博(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事电力系统分析与电网规划等方面的研究工作; E-mail: 2293107@qq.com

赵红生(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力调度运行与电网规划等方面的研究工作。E-mail: 183575350@qq.com

(编辑 魏小丽)