

含分布式电源的交直流配网双层规划研究

蒋贤强¹, 徐青山¹, 柳丹², 袁晓冬², 李强²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:随着分布式电源的日益增多,交直流配网的发展势不可挡,文中针对其规划问题提出一种双层规划模型。第一层模型以系统建设成本和运行成本为目标函数,第二层模型使用经济调度细化第一层模型中运行成本的计算,使规划结果更加精确。针对不同的母线类型、支路类型和网络拓扑,提出一种交直流配网的网络编码方式,并嵌套智能算法,求解双层模型。算例采用13节点待规划网络,规划结果表明交直流配网在运行成本、线路建设费用、电压源型换流器(voltage source converter, VSC)安装费用和电源安装成本等方面都优于传统交流配网。

关键词:交直流配网; 配网规划; 双层规划; 经济调度

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)04-0027-06

0 引言

随着负荷的日益增加,传统配网很难满足其需求,尤其是在负荷密集的商业区,限于土地的原因,现有网架难以扩充,因此,提高配电网的供电能力显得尤为重要^[1]。研究表明,相同网络下,直流配网的供电容量是交流的1.5倍^[2],且随着分布式电源的大力发展,需要考虑合理的消纳方法,由于分布式电源的输出多数为直流,或者高频交流,因此,直流配网是其理想的消纳场所。但交流配网转直流配网是一项浩大的工程,因此其中间状态,即交直流配网值得深入研究^[3-4]。

虽然已有交直流规划的研究较少,但是交流配网的规划技术相对成熟。文献[5]提出一种考虑配电网网络架构的编码方式,将分布式电源的环境效益作为目标函数的一部分,利用改进遗传算法对配电网进行规划;文献[6]提出一种考虑微电网接入的配电网规划模型,分析涉及配电网的定容、定址等问题;文献[7]提出一种节点关联矩阵的网络修复算法,使配电网满足辐射状,然后综合考虑配网的经济性和可靠性,利用多目标优化算法得出规划的Pareto解;文献[8]提出一种最大化线路供电容量的规划方法,并提出提高供电容量首先改变网络结构其次增加变电站容量的想法。但是所有的规划都仅仅停留在传统交流配网的层面上,并未考虑交直流网络或直流网络的规划方法。

收稿日期:2018-03-09;修回日期:2018-04-27

基金项目:江苏省产学研前瞻项目(BY2016076-12);中央高校基本科研业务费专项资金资助;江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(3216007711)

为解决上述问题,借鉴以往交流规划方法,文中提出一种交直流网络的开荒式规划方法,在考虑负荷和分布式电源随机性的基础上,建立一个以运行成本和建设成本为目标函数的双层规划模型,为增加规划的精确性,其运行成本考虑经济调度的影响。模型的求解采用一种新型网络编码方式。最后仿真对比验证交流网络和交直流网络规划的结果,得出所提规划方法的准确性。

1 交直流配网网架结构

1.1 母线结构

交直流系统包含交流母线和直流母线。针对交流母线,交流分布式电源可直接或通过交流变压器接入,直流分布式电源则需通过DC/AC逆变器接入,交流负荷由交流母线直接供电,直流负荷则需通过AC/DC整流器接入交流母线;针对直流母线,直流分布式电源可直接或通过直流变压器接入,交流分布式电源则需通过AC/DC整流器接入母线,直流负荷由母线直接供电,交流负荷则需通过DC/AC逆变器接入母线。交、直流母线结构如图1、图2所示,其中DG为分布式电源。

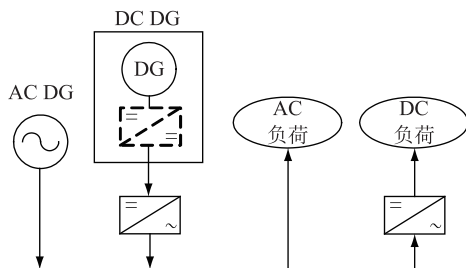


图1 交流母线结构

Fig.1 AC bus

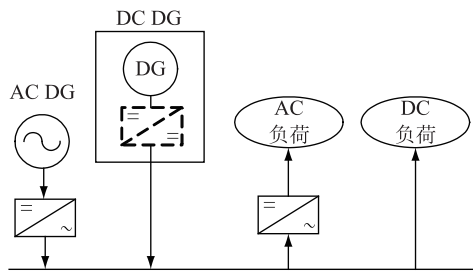


图2 直流母线结构

Fig.2 DC bus

对比图1、图2可以看出,在接入相同分布式电源和负荷的情况下,交流和直流供电方式包含不同类型和数目的换流器,其成本和电能转换效率不同,因此从规划的经济方面考虑,针对不同类型的分布式电源和负荷采用合适的母线能够实现经济效益的优化。

1.2 支路类型

考虑到相同电压等级、相同距离直流传输的损耗比交流传输小,交直流配网中的支路类型尽量以直流传输为主。鉴于此,支路类型可分为以下4种:(1)交流母线—交流支路—交流母线;(2)交流母线—直流支路—交流母线;(3)交流母线—直流线路—直流母线;(4)直流母线—直流线路—直流母线,对应的拓扑结构如图3所示。

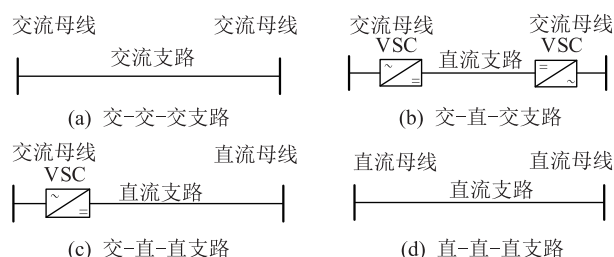


图3 支路类型

Fig.3 Branch type

2 交直流配网元件模型

2.1 VSC 换流站模型

基于全控型电力电子器件的电压源型换流器(voltage source converter, VSC)具有调节速度快,有功无功独立调节,双向潮流等优点,使直流配电成为可能。忽略其无功损耗,VSC可以等效为理想换流器、虚拟节点和有功损耗电阻的组合,等效模型电路图如图4所示^[9]。据图4可得,节点*i*和虚拟节点*k*间的电压幅值关系为:

$$V_i^{\text{ac}} = K_c M V_k^{\text{dc}} \quad (1)$$

式中: V_i^{ac} , V_k^{dc} 分别交流母线和虚拟母线的电压幅值; K_c 为VSC变比; M 为VSC调制系数。

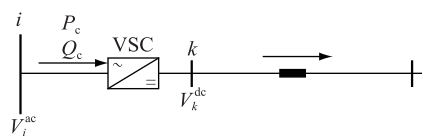


图4 VSC 等效电路

Fig.4 VSC equivalent circuit

选取交直流侧电压的基准值:

$$V_{\text{Base}}^{\text{ac}} = K_c V_{\text{Base}}^{\text{dc}} \quad (2)$$

据此可得,标幺制下节点*i*和虚拟节点*k*间的电压幅值关系为:

$$V_{i,\text{p.u.}}^{\text{ac}} = M V_{k,\text{p.u.}}^{\text{dc}} \quad (3)$$

交直流侧有功功率的关系为:

$$P_c = \frac{V_k^{\text{dc}} I^{\text{dc}}}{\eta_c} \quad (4)$$

式中: P_c 为VSC交流侧功率; V_k^{dc} , I^{dc} 分别为VSC直流侧电压和电流; η_c 为转换效率。

将式(1)带入式(4),消去虚拟节点的电压幅值,可得:

$$P_c = \frac{V_k^{\text{dc}} I^{\text{dc}}}{\eta_c} = \frac{G^{\text{dc}}}{\eta_c} [M^{-2} (V_i^{\text{ac}})^2 - M^{-1} V_i^{\text{ac}} V_j^{\text{dc}}] \quad (5)$$

式中: G^{dc} 为VSC等效电导。

交流侧无功为:

$$Q_c = P_c \tan \varphi_c \quad (6)$$

式中: φ_c 为通过VSC控制的功率因数角。

2.2 分布式电源及负荷模型

负荷和分布式电源的模型已有相当数量的研究,文中认为负荷服从正态分布,其概率密度函数如式(7)所示^[10];认为光伏服从Beta分布,其概率密度函数如式(8)所示^[11];认为风速服从威布尔分布,其概率密度函数如式(9)所示^[12]。根据负荷与分布式能源的概率密度函数,通过蒙特卡洛抽样的方式得出它们的功率。

$$f(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中: l 为负荷大小; u 为负荷均值; σ 为负荷分布标准差。

$$f\left(\frac{r}{r_{\text{max}}}\right) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \left(\frac{r}{r_{\text{max}}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\text{max}}}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

式中: r 为光照强度; r_{max} 为一段时间内的最大光照强度;规则化因子 $B(\alpha, \beta)$ 是欧拉中的B函数。 α, β 分别是分布函数的两个形态参数,由该时间段内的实际光照强度决定。

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (9)$$

式中: x 为风速大小; k 和 c 分别是威布尔分布的形状参数和尺度参数。

3 交直流配网双层规划模型

与传统交流配网不同,交直流配网中含有高渗透率分布式电源,文中通过蒙特卡洛技术^[13-14]模拟不同时期分布式电源的影响。配网的规划需要考虑长期的经济效益,为精确表达长期的经济效益,需要考虑实时运行带来的成本,因此,文中提出一种双层规划模型,第一层规划考虑系统长期经济成本,第二层规划考虑实时调度运行成本。

3.1 第一层规划模型

(1) 目标函数。以建设成本和运行成本为目标函数,前者包括传统发电机、分布式电源、线路和 VSC 安装成本,后者包括传统发电机、分布式电源的运行成本。

$$\min Z_{\text{main}} = C_{\text{PV}} \quad (10)$$

$$C_{\text{PV}} = C_{\text{I}} + C_{\text{R}} \quad (11)$$

$$C_{\text{R}} = \sum_{t=1}^{T_p} \frac{C_t}{(1+d)^t} \quad (12)$$

$$C_t = 8760C_{\text{OPF},t} + \lambda C_{\text{I}} \quad (13)$$

式中: C_{I} 为电源安装成本; C_{R} 为电源运行成本; d 为折现率; C_t 为年运行成本; $C_{\text{OPF},t}$ 为经济调度后每小时电源运行成本; λ 为货币每年贬值的比率。

(2) 约束条件。在配网网络构建的过程中,由于母线传输功率的上限,出于安全考虑,单个母线不允许与过多其他母线相连,而且还要求母线不能被孤立,因此,母线间的支路数存在上下限。约束条件表达式为:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{N_b} U(n,m) \leq L^{\max}, L^{\min} \leq L^{\max} & \forall n \in N_b \\ \sum_{m=1}^{N_b} U(n,m) \leq L^{\min}, 1 \leq L^{\min} \leq L^{\max} & \forall n \in N_b \end{cases} \quad (14)$$

式中: L^{\min} 为母线支路数下限; L^{\max} 为母线支路数上限; N_b 为节点数。

3.2 第二层规划模型

交直流配网的规划中,由于系统随机性的增加,系统的运行状态也会随着随机变化,因此考虑系统将来的运行成本时,需要通过对交直流配网调度运行的模拟,来提高规划的精确性。

第二层模型的提出,是在第一层模型给出待计算成本的网路后,针对该网路进行实时调度的模拟。在利用多场景技术确定系统分布式电源和负荷的大小后,系统中传统电源根据经济调度的指令

而发电,要确定其运行成本,必须模拟经济调度场景,确定其出力。

经济调度采用最优潮流的方法,以最小化系统运行成本为目标函数,系统安全为不等式约束,系统潮流为等式约束。

(1) 目标函数。目标函数为电源运行成本,包括传统发电机和分布式电源,计算规则为电源出力与单位出力的运行成本系数的积。表达式如下:

$$\min Z_{\text{sub}} = \sum_{i=1}^{I_{\text{ac}}} C_{G_i}^{\text{ac}} P_{G_i}^{\text{ac}} + \sum_{j=1}^{J_{\text{dc}}} C_{G_j}^{\text{dc}} P_{G_j}^{\text{dc}} \quad (15)$$

式中: $C_{G_i}^{\text{ac}}$ 为第 i 台交流电源的成本系数; $P_{G_i}^{\text{ac}}$ 为第 i 台交流电源的功率; $C_{G_j}^{\text{dc}}$ 为第 j 台直流电源的成本系数; $P_{G_j}^{\text{dc}}$ 为第 j 台直流电源的功率。

(2) 不等式约束条件。

① 发电机安全约束:

$$\begin{cases} P_{G_i}^{\text{ac}_{\min}} \leq P_{G_i}^{\text{ac}} \leq P_{G_i}^{\text{ac}_{\max}} & \forall i \in I_{\text{ac}} \\ P_{G_j}^{\text{dc}_{\min}} \leq P_{G_j}^{\text{dc}} \leq P_{G_j}^{\text{dc}_{\max}} & \forall j \in I_{\text{dc}} \\ Q_{G_i}^{\text{ac}_{\min}} \leq Q_{G_i}^{\text{ac}} \leq Q_{G_i}^{\text{ac}_{\max}} & \forall i \in I_{\text{ac}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{G_i}^{\text{ac}}$, $Q_{G_i}^{\text{ac}}$, $P_{G_j}^{\text{dc}}$ 分别为交流电源的有功、无功出力和直流电源的有功出力; $P_{G_i}^{\text{ac}_{\min}}$, $P_{G_i}^{\text{ac}_{\max}}$, $Q_{G_i}^{\text{ac}_{\min}}$, $Q_{G_i}^{\text{ac}_{\max}}$, $P_{G_j}^{\text{dc}_{\min}}$, $P_{G_j}^{\text{dc}_{\max}}$ 分别为其上下限; I_{ac} , I_{dc} 分别为交、直流电源数目。

② 母线及支路安全约束:

$$\begin{cases} V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max} & \forall n \in N_b \\ S_{nm} \leq S_{nm}^{\max} & \forall n, m \in N_b \end{cases} \quad (17)$$

式中: V_n 为母线 n 的电压; S_{nm} 为支路 nm 上流过的复功率。

③ VSC 约束:

$$\begin{cases} S_c \leq S_c^{\max} & \forall c \in N_c \\ M_{nm}^{\min} \leq M_{nm} \leq M_{nm}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: S_c 为逆变器传输功率, S_c^{\max} 为其上限; M_{nm} 为逆变器调制比, M_{nm}^{\max} , M_{nm}^{\min} 分别为其上下限; N_c 为逆变器数目。

(3) 等式约束条件。

$$\begin{cases} P_n^{\text{inj}} = P_n^{\text{cal}} & \forall n \in N_b \\ Q_n^{\text{inj}} = Q_n^{\text{cal}} & \forall n \in N_b \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_n^{inj} , Q_n^{inj} 分别为节点实际注入有功无功; P_n^{cal} , Q_n^{cal} 分别为其潮流计算结果。

4 计算方法及流程

4.1 编码方式

交直流配网规划方法方面研究较少,文中以传统网络编码方式为基础,针对交直流配网与传统配

网架的不同,包括母线类型、支路类型等,提出一种交直流网架的二进制编码方式,如图5所示。

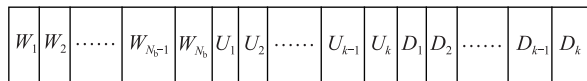


图5 网络拓扑二进制编码结构

Fig.5 The binary coding structure of network

(1) 以母线是否为直流节点确定 $W(n)$ 是否为1; (2) 以母线之间是否相连确定 $U(n, m)$ 是否为1; (3) 以线路是否为直流线路确定 $D(n, m)$ 是否为1。

4.2 计算流程

鉴于遗传算法是求解优化问题的基础而高效的算法^[15-16],文中通过对电力网络的二进制编码,嵌套遗传算法进行求解。

(1) 对待规划交直流配电网络生成一组二进制编码,作为初始种群;

(2) 对每一个种群中的个体,建立第一层规划模型,其中的运行成本通过二层规划模型确定;

(3) 建立第二层规划模型;

(4) 利用遗传算法得出第二层规划模型的经济调度结果;

(5) 将(4)的结果代入第一层规划模型,计算其目标函数,重复(2)~(5),计算每个个体适应值;

(6) 若达到收敛精度或迭代次数,结束计算,反之,种群选择、交叉、变异后返回第(2)步。其中,遗传算法的选择、交叉和变异操作如下^[17]:

选择:采用轮盘赌的方式,即计算每个个体的适应值,适应度函数选择目标函数的倒数,以个体适应值占总适应值的比值作为个体被选中的概率。

交叉:采用单点交叉的形式,将2个个体的部分结构进行交换,形成新的个体。

变异:对种群中的所有个体以事先设定的变异概率判断是否进行变异,然后对进行变异的个体随机选择变异位变异。

5 算例分析

文中采取图6所示的13节点待规划网络作为算例,电压等级为10 kV,节点1为平衡节点,其余节点上接有交、直流负荷和分布式电源,详细数据见表1。

(1) 交流规划结果。将二进制变量 W 和 D 设为0,则规划结果为纯交流,拓扑如图7所示。可以看出,网络满足约束要求,呈辐射状,且无节点孤立。

(2) 交直流规划结果,如图8所示。其中,实线线路为交流支路,虚线为直流支路,实线母线为交

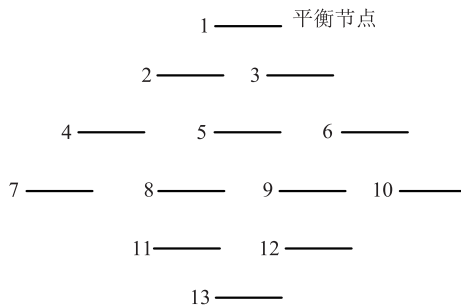


图6 待规划网络

Fig.6 Distribution network to be planned

表1 13节点待规划网络数据参数

Tab.1 Data of 13 nodes distribution network to be planned

节点编号	电源类型	电源额定功率/MW	交流负荷有功/MW	交流负荷无功/Mvar	直流负荷/MW
1	发电机	10	—	—	—
2	—	—	0.5	0.25	1.25
3	—	—	—	—	1.25
4	光伏	1.5	0.5	0.25	—
5	—	—	0.5	0.25	0.5
6	—	—	0.75	0.35	0.75
7	光伏	1.5	0.5	0.25	—
8	发电机	2	1	0.45	1.25
9	风机	1	—	—	0.85
10	发电机	2	0.5	0.25	0.5
11	光伏	1.5	—	—	—
12	—	—	—	—	1.25
13	微型燃气轮机	2	0.75	0.35	0.85

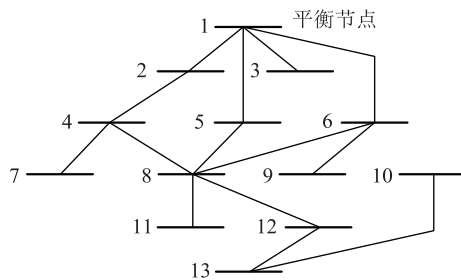


图7 交流规划结果

Fig.7 AC planning results

流母线,虚线母线为直流母线。交流母线与直流支路连接、交流母线给直流负载供电以及直流母线给交流负载供电时,需连接VSC换流器,其成本也考虑进目标函数,但为了图像清晰,未在图8绘出。

在规划成本计算中,假设交直流配网的运行寿命为20 a,且各节点的电源已经安装好,不计入规划成本中。通过负荷与分布式电源的模型,模拟一年四季四个季度典型日的数据,从而得出每一年负荷与分布式电源的出力,进而根据式(12)求出20 a系统的

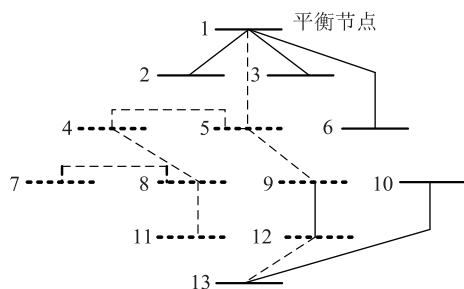


图8 交直流规划结果

Fig.8 AC/DC planning results

运行成本。假设线路建设费用为 12 万元/km, VSC 安装成本为 1200 元/kW。交直流系统成本对比如表 2 所示。

表 2 交直流系统成本对比

Tab.2 Costs comparison of AC/DC distribution system

项目	交流网络费用	交直流网络费用
20 a 总运行成本	5 500.4	5 404.9
线路建设费用	188.5	134.9
VSC 换流器安装费用	225.3	193.5
总成本	5 914.2	5 733.3

表 2 中列出了部分规划费用,包括 20 a 总运行成本、线路建设费用和 VSC 换流器安装费用等,根据全部成本计算其净现值。对比分析交流网络费用和交直流网络费用得出如下结论:

(1) 交直流网络运行成本低。由于直流网络传输损耗比交流低,导致相同负荷需求时,交流网络中的电源需要提供更多输出,导致运行成本的增加。但是由于损耗本来就较小,因此这一块交直流网络的优势不算特别明显。20 a 总运行成本方面,交直流网络比交流网络低 1.74%。

(2) 交直流系统线路建设费用低于交流系统。由于交流线路传输容量比直流线路小,而且分布式电源的加入导致线路功率不断变化,以至于单条支路更加容易发生功率越限。以节点 8 为例,由于负荷需求大,为保证供电可靠,交流网络需更多的支路来供电,导致线路建设费用的增加。

(3) 交直流系统 VSC 换流器费用低于交流系统。本系统中,直流负荷 8.45 MW,交流负荷有功无功总和 7.4 MW,可见纯交流供电需要更多数目的 VSC 换流器。同时分布式电源日益增多,纯交流系统和交直流系统 VSC 换流器费用差距将越来越大。

(4) 交直流网络总成本低于交流网络,随着总负荷的增大,交流网络线路传输功率的劣势日益显现,并且随着分布式电源的增多,交直流网络对比传统交流网络的经济优势将越来越大。

6 结语

针对目前交直流配网规划方面研究的欠缺,提出一种考虑负荷和分布式电源随机性的基于双层规划模型的规划方法。其中,第一层模型以系统建设成本和运行成本为目标函数,针对其中的运行成本,为提高计算精度建立第二层经济调度模型,即考虑网络的实时运行状态,得出全年的运行成本。

双层模型的求解方法采用一种新型二进制编码嵌套遗传算法求解。文中针对母线间是否连接,母线是否为直流母线和支路是否为直流线路提出一种新型网络编码方式,能够涵盖所有的网络拓扑,母线类型和支路类型。

算例采用一个待规划的 13 节点配网,运用所提的模型和方法,对该算例进行纯交流和交直流的规划计算。规划结果表明,在相同的负荷与分布式电源的大小和分布前提下,交直流配网在运行成本、线路建设费用、VSC 换流器安装费用和电源安装成本等方面都比传统交流配网经济。

参考文献:

- [1] 欧阳武,程浩忠,张秀彬,等.城市中压配电网最大供电能力评估方法[J].高电压技术,2009(2):403-407.
OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Evaluation method for maximum load capability of urban medium-voltage distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2009(2): 403-407.
- [2] 马骏超,江全元,余鹏,等.直流配电网能量优化控制技术综述[J].电力系统自动化,2013,37(24):89-96.
MA Junchao, JIANG Quanyuan, YU Peng, et al. Survey on energy optimized control technology in dc distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 89-96.
- [3] 曾嘉思,徐习东,赵宇明.交直流配电网可靠性对比[J].电网技术,2014,38(9):2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Kidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of ac and dc distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [4] 雷婧婷,安婷,杜正春,等.含直流配电网的交直流潮流计算[J].中国电机工程学报,2016,36(4):911-918.
LEI Jingting, AN Ting, DU Zhengchun, et al. A unified ac/dc power flow algorithm with dc distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 911-918.
- [5] 麻秀范,崔换君.改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J].电工技术学报,2011,26(3):175-181.
MA Xiufan, CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [6] 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(22):41-45.

- DAI Shang, ZHANG Yan, ZHU Dakang. Distribution network planning method containing micro-grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010 (22): 41-45.
- [7] 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.
- [8] 肖峻, 张婷, 张跃, 等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 106-113.
- XIAO Jun, ZHANG Ting, ZHANG Yue, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 106-113.
- [9] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
- SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart dc distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [10] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
- LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [11] 刘华鹏. 基于威布尔分布的风机齿轮箱元件最优更新时间[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(4): 62-65.
- LIU Huapeng. Optimal replacing intervals of wind turbine gearboxes elements based on weibull distribution [J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(4): 62-65.
- [12] 任洲洋, 颜伟, 项波, 等. 考虑光伏和负荷相关性的概率潮流计算[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 181-187.
- REN Zhouyang, YAN Wei, XIANG Bo, et al. Probabilistic power flow analysis incorporating the correlations between pv power outputs and loads [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 181-187.
- [13] 段玉兵, 龚宇雷, 谭兴国, 等. 基于蒙特卡罗模拟的微电网随机潮流计算方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 274-278.
- DUAN Yubing, GONG Yulei, TAN Xingguo, et al. Probabilistic power flow calculation in microgrid based on monte-carlo simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 274-278.
- [14] 方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于非参数核密度估计的扩展蒙特卡罗随机潮流方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 21-28.
- FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. An extend quasi monte carlo probabilistic load flow method based on non-parametric kernel density estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 21-28.
- [15] 李一峰, 姜勇. 基于遗传算法的变压器局部放电超声定位法[J]. 江苏电机工程, 2000, 19(4): 24-26.
- LI Yifeng, JIANG Yong. Ultrasonic location of partial discharge in transformer by genetic algorithm [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2000, 19(4): 24-26.
- [16] 陆东生. 10 kV 配电线路非节点无功优化算法[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(2): 58-60.
- LU Dongsheng. Algorithm of non-node reactive power optimization for 10 kV distribution lines [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(2): 58-60.
- [17] 赵亮, 睢刚. 基于遗传算法的热工过程辨识[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(3): 76-78.
- ZHAO Liang, JU Gang. System identification of thermal process based on genetic algorithm [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(3): 76-78.

作者简介:



蒋贤强

蒋贤强(1993—),男,硕士研究生,研究方向为交直流配网规划与运行(E-mail: 387624995@qq.com);

徐青山(1979—),男,博士,教授,研究方向为分布式能源、需求响应、交直流配网(E-mail: xuyingshan@seu.edu.cn);

柳丹(1988—),女,硕士,工程师,从事微网运行与分析工作。

Two-layer Model of AC/DC Distribution Network Containing DGs

JIANG Xianqiang¹, XU Qingshan¹, LIU Dan², YUAN Xiaodong², LI Qiang²

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

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the increasing of distributed generation number, the development of AC/DC distribution network is unstoppable. A two-layer planning model is proposed to handle the planning problem of AC/DC distribution network. The objective functions of the first layer are system construction and operating costs. The second layer calculates the operating costs in detail by economic dispatch, which makes the result more accurate. For different bus types, branch types and network topologies, a binary coding model of AC/DC distribution network is put forward, which can be nested into intelligent algorithm conveniently. A 13-bus case study indicates that AC/DC distribution network is more economical than tradition AC distribution system in operating costs, line construction costs, VSC installation costs and generator installation costs.

Key words: AC/DC distribution network; distribution network planning; two-layer model; economic dispatch

(编辑 方晶)