



考虑换流器功率传输裕度的直流配电网优化重构研究

柴睿 王磊 韩肖清 王金浩 李胜文 张馨方

Research on Optimal Reconfiguration of DC Distribution Network Considering Converter Power Transmission Margin

CHAI Rui, WANG Lei, HAN Xiaoqing, WANG Jinhao, LI Shengwen, ZHANG Xinfang

引用本文:

柴睿, 王磊, 韩肖清, 等. 考虑换流器功率传输裕度的直流配电网优化重构研究[J]. 现代电力, 2021, 38(5): 561–571. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0025

CHAI Rui, WANG Lei, HAN Xiaoqing, et al. Research on Optimal Reconfiguration of DC Distribution Network Considering Converter Power Transmission Margin[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(5): 561–571. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0025

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

城市配网改造下中压直流配电网的供电能力分析

Research on the Power Supply Capacity of Medium Voltage DC Distribution Network in Urban Distribution Network Transformation
现代电力. 2018, 35(2): 56–63 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I2/56>

计及DG与负荷时序特性的直流配电网规划

DC Distribution Network Planning Considering Timing Characteristics of Distributed Generations and Loads
现代电力. 2018, 35(5): 62–69 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I5/62>

基于下垂特性的柔性直流配电系统控制策略

Control Strategy of Flexible DC Distribution System Based on Droop Characteristics
现代电力. 2020, 37(4): 391–398 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0574>

考虑无功裕度的电压自适应分区方法及主导节点的选择

Voltage Adaptive Partitioning Method and Optimal Pilot-node Selection Considering Reactive Power Margin
现代电力. 2020, 37(2): 117–124 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0311>

基于电力电子变压器的交直流混合配电网日前经济运行策略研究

Research on Power Electronic Transformer Based Day-ahead Economic Operation Strategy of AC/DC Hybrid Distribution Network
现代电力. 2021, 38(3): 339–345 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0393>

基于自适应下垂控制的直流微电网群分层协调控制

Hierarchical Coordinate Control for DC Microgrid Clusters Based on Adaptive Droop Control
现代电力. 2018, 35(4): 72–79 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I4/72>

考虑换流器功率传输裕度的直流配电网优化重构研究

柴睿¹, 王磊¹, 韩肖清¹, 王金浩², 李胜文², 张馨方¹

(1. 电力系统运行与控制山西省重点实验室(太原理工大学), 山西省太原市 030024;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西省太原市 030000)

Research on Optimal Reconfiguration of DC Distribution Network Considering Converter Power Transmission Margin

CHAI Rui¹, WANG Lei¹, HAN Xiaoqing¹, WANG Jinhao², LI Shengwen², ZHANG Xinfang¹

(1. Shanxi Key Lab of Power System Operation and Control (Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024, Shanxi Province,

China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030000, Shanxi Province, China)

摘要: 直流配电网中可变负荷功率波动大, 当换流器功率传输裕度(可通过自适应下垂系数表征)较小时, 换流器传输功率易达限值, 失去对潮流变化的响应能力。为解决上述问题, 将换流器自适应下垂系数、网络损耗、节点电压偏移作为直流配电网架结构优化的寻优目标, 经隶属函数模糊化处理得到目标函数, 并采用牛顿迭代法对计及换流器准确损耗模型的直流配电网进行潮流计算, 最终由二进制粒子群算法迭代求得上述指标综合最优的直流配电网架结构。在修改后的 IEEE33 节点直流配电网中验证了其正确性和有效性。

关键词: 直流配电网; 功率传输裕度; 自适应下垂系数; 准确损耗模型; 二进制粒子群

Abstract: The power of variable loads in the DC distribution network fluctuates greatly. When the converter power transmission margin (which can be characterized by self-adaption droop coefficient) is small, the converter transmission power is easy to reach the limit, and the ability of responding to the change in power flow will be lost. To cope with above mentioned problem, the converter adaptive droop coefficient, network loss, and nodal voltage offset were taken as the optimizing goals of the DC distribution network structure optimization. The objective function was obtained through the membership function fuzzy processing, and by use of Newton-Raphson method the power flow calculation of the DC distribution network, in which the accurate loss model of the converter was taken account, was carried out. Finally, by means of the iteration of binary particle swarm algorithm the DC distribution network frame structure with synthetical optimum of above mentioned indicators was obtained. The correctness and effectiveness of the proposed DC distribution network frame structure are verified by the modified IEEE33 bus DC distribution network.

Keywords: DC distribution network; power transmission margin; adaptive droop coefficient; accurate loss model; binary particle swarm

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0025

0 引言

直流配电网在效率、电能质量等方面的优势逐渐显现, 同时能更为方便、经济地接入规模日益扩大的新能源分布式发电, 因而近些年在直流配电网示范应用、直流电压等级序列、典型应用场景、故障保护等方面都开展了一系列研究^[1-9]。配电网网架结构优化可以提升系统电能质量及实现经济运行, 但目前对于直流配电网的网架结构优化研究相对较少。

传统交流配电网网架结构静态重构与动态优化已有较为完备的理论, 直流配电网网架结构的优化在算法流程和研究步骤上可以借鉴交流配电网, 但由于两者节点类型、线路参数等的不同, 以及直流配电网中关键部分换流站的损耗和控制方式对系统影响较大, 使得它们在条件约束和目标函数方面有所不同, 需要特别考虑。

文献[10]和文献[11]分别在考虑环网检测和主动配电网控制技术的情况下研究了交流配电网网架结构的静态优化重构和动态重构, 但并未研究直流配电网; 文献[12-13]研究了基于下垂控制的直流配电网的综合调度和最优潮流, 但未研究直流网架结构对直流配网优化运行的影响; 文献[14]研究了交直流混合配电网中以网损最小

为优化目标时的网架结构优化问题,采用邻域寻优贪心策略结合自适应步长缩放因子和发现概率改进算法,使算法具有良好的前期全局搜索和较高的后期局部寻优能力,但仅研究了交流配电网的网架结构优化问题,并未对直流系统的网络结构进行优化;文献[15]指出直流侧不同网架结构会影响交直流配电网的供电能力,进而对交直流混合配网结构进行优选,但未考虑核心设备换流器控制方式对优化重构的影响;文献[16]考虑了光伏出力与负荷不确定性因素之间相关性,采用多目标粒子群算法和基于深度优先搜索的所有生成树算法对光伏接入容量与网架结构进行经济性的上下层协同优化,但在优化时未考虑直流配网中关键部分换流器控制系数对系统不平衡功率调节能力的影响。

本文重点考虑直流配电网中核心设备交/直流(AC/DC)换流器采用下垂控制时对直流配电网网架结构优化的影响。在参考交流配电网网架结构寻优的基础上,结合换流器损耗模型及下垂控制方式计算直流系统潮流,考虑换流器功率传输裕度,即将换流器自适应下垂系数引入寻优目标函数,并对其模糊化处理,进而利用二进制粒子群算法进行求解,最终得到一套可综合优化直流配电网节点电压、网络损耗和换流器功率传输裕度的网架结构寻优算法。

1 采用自适应下垂控制的直流配电网稳态数学模型

直流配电网的拓扑形式主要包括辐射状、双端、三端和多端拓扑,本文针对辐射状拓扑进行研究。直流配电网通常以直流线路为主网架,通过换流站与交流电网相连提供功率支撑,并接入分布式电源作为功率补偿,最终经AC/DC变换或直流-直流(DC-DC)变换将功率传输给交流负荷或直流负荷,典型直流配电网单端辐射式拓扑如图1所示[17]。

直流配电网为实现各单元协调运行,稳定直流电压,可参考直流输电采用以下3种控制策略:主从控制、电压裕度控制、电压斜率控制(即下垂控制)。主从控制是令某一端换流器采用定直流电压控制并作为主换流器,而剩余从换流器采用定有功功率控制。主从控制主要缺点在于当定

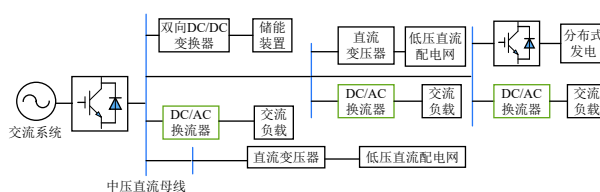


图1 直流配电网辐射式拓扑

Fig. 1 Radiation topology DC distribution network

直流电压控制的换流器达到其输出限值时,主换流器将不再能够调节直流电压平衡使得网络功率失衡,而采用备用的从换流器时需要站间通信,增加了系统设计的复杂程度;电压裕度控制是指利用主换流器控制直流电压,并设置部分恒定电流控制器,而所有从换流器在控制直流电流恒定时,设置部分恒定电压控制器,优点是系统运行方式改变时对系统冲击小,缺点是受通信方式性能影响较大;而下垂控制不依赖通信,同时方便分布式电源接入,一方面可以稳定直流电压,另一方面有利于实现功率的合理分配。

在实际运行中,直流配电网常接入较大规模的分布式电源,同时灵活用电负载如电动汽车等均会增加功率变化的不确定性。传统换流器下垂系数并不随着具体网络结构变化而变化,而是仅根据换流器容量和线路额定参数确定且固定不变。直流网络中各个换流器分配的功率不平衡量与下垂系数的大小正相关,下垂系数不变会造成当负荷变化较大引起系统功率平衡变化时,换流器达到功率传输极限,由下垂控制转为定功率控制使得不平衡功率得不到合理分配调节,最终导致直流系统电压失稳,因而需要采用考虑换流器功率裕度的自适应调节的下垂系数[18]。

分布式电源采用自适应下垂系数的下垂控制,是根据换流器直流电流,分析此时注入系统的功率情况从而确定需要调整的换流器电流参考值以平衡功率波动,此时换流器直流电流绝对值即为对应换流器功率裕度,在采用下垂控制以期实现功率合理分配时,需要考虑不同网架结构下的自适应下垂系数,使得在可能出现的系统功率波动后,换流器有足够裕度调节可能出现的功率不平衡。

1.1 电压源型换流器模型

电压源型换流器(voltage source converter, VSC)物理模型如图2,交流电网经变压器、接地连接滤波器和相电抗器与换流器相连,实现交直

流转换。

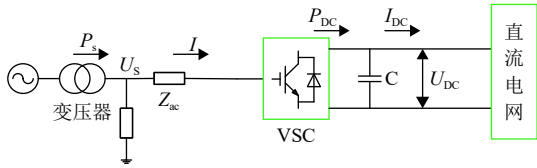


图 2 VSC 模型
Fig. 2 Model of VSC

采用电压功率下垂控制的换流器直流侧电压和注入有功功率需满足如下特性方程：

$$P_{dc} = P_{dcref} - \frac{U_{dc} - U_{dcref}}{k} \quad (1)$$

即换流器向直流系统注入的功率 P_{dc} ，由功率参考值 P_{dcref} 、电压参考值 U_{dcref} 、节点电压 U_{dc} 和下垂系数 k 共同决定，调整下垂系数可以调整注入换流器的功率。

1.2 DC-DC 直流变压器模型

DC-DC 直流变压器模型如图 3 所示。其中： R 为 DC-DC 换流器内部损耗等效电阻； U_{DCi} 、 U_{DCj} 分别是 DC-DC 换流器两侧直流电压； I_{DCi} 、 I_{DCj} 分别是两侧直流电流； m 是换流变压器变比。

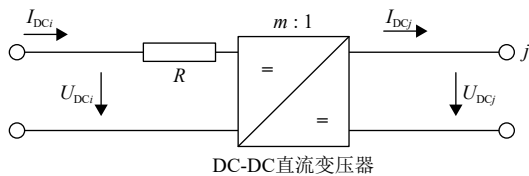


图 3 DC-DC 直流变压器模型
Fig. 3 Model of DC-DC transformer

其等效电路可仿照交流变压器模型采用 π 型等值电路如图 4 所示。

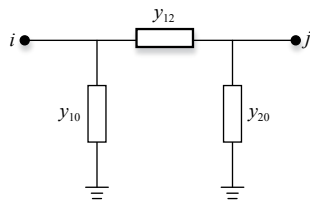


图 4 直流变压器 π 型等值电路
Fig. 4 π shape equivalent circuit of DC transformer

其中 $y_{12} = \frac{m}{R}$, $y_{10} = \frac{1-m}{R}$, $y_{20} = \frac{m^2-m}{R}$ ，结合直流电网电导矩阵得到含直流变换器的直流潮流计算模型。

1.3 VSC 及直流变压器损耗模型

VSC 损耗模型主要分 3 种，即只考虑稳态运

行损耗时的简单模型、精确模型以及考虑换流器能量传递过程的积分模型^[19]。简单模型即直接根据工程中常用换流器损耗率得到其传输效率来计算损耗；精确模型是根据 IEC62751 标准的建议，利用电磁暂态仿真计算并由曲线拟合计算损耗，具体表示为换流器电流 I_{ci} 的二次函数^[10]，即

$$P_{lossi} = a_i + b_i I_{ci} + c_i I_{ci}^2 \quad (2)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 是不同类型损耗的损耗特性参数， a_i 为换流器空载损耗； b_i 、 c_i 分别为换流器线性损耗和非线性损耗的损耗因子。设 c_R 为整流器损耗系数； c_I 为逆变器损耗系数^[20]，其计算公式如式 (3) 所示^[21]。

$$\begin{cases} a_i = \frac{6.62S_{Ni}}{600S_B} \\ b_i = \frac{1.8V_{Ni}}{600V_B} \\ c_R = \frac{1.98(V_{Ni})^2 S_B}{600(V_B)^2 S_{Ni}} \\ c_I = \frac{3.0(V_{Ni})^2 S_B}{600(V_B)^2 S_{Ni}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： S_{Ni} 和 S_B 分别是换流器的额定容量和系统基准容量； V_{Ni} 和 V_B 分别是换流器直流侧电压和系统额定电压。

则位于节点 i 的联网变流器 VSC 注入功率为

$$P_{in} = P_{dci} + P_{lossi} \quad (4)$$

位于节点 j 的直流变压器 DC-DC 输出功率为

$$P_{dload} = P_{dcj} - P_{lossj} \quad (5)$$

积分模型是指考虑换流器中绝缘栅双极型晶体管 IGBT 和续流二极管在开关暂态过程中的开关和导通损耗得到的模型^[22]。

由于换流器损耗的积分模型着重描述在开关状态变化时的暂态过程，因而本文在稳态潮流计算时针对不同换流器分别采用了损耗的简单模型与精确模型。

2 直流配电网潮流计算模型

直流配电网潮流计算相较交流可作一定简化。例如在交流潮流计算中的节点通常分为节点注入有功无功功率已知的 PQ 节点、节点有功和电压幅值已知的 PV 节点、平衡节点，而直流配电网潮流计算一般分为定 P 节点和定 V 节点，即在进行潮流计算时只考虑线路电导和节点有功功率，

不考虑无功与电抗,相应地也不考虑电压相角。传统的交流配电网一般采用前推回代或牛顿拉夫逊法计算潮流,前推回代对于复杂的带有环路的电路难以求取潮流,因而直流配电网潮流计算多采用改进的牛顿拉夫逊法。

直流配电网潮流计算中处理多个下垂节点时可将同交流配电网相连的联网换流器所在节点作为平衡节点,其余下垂节点在潮流计算中由于稳定运行点未知,先假设有功功率参考值为节点注入功率,而初始下垂系数 k 取参考值 k_{ref} ,有功功率参考值 P_{dcref} 就取所连负荷额定功率。电压参考值 U_{dcref} 取1.02倍的标么值,根据每次迭代后节点电压值修正节点注入功率^[23]。

将节点电压作为状态变量,通过求解节点电压求得线路潮流分布,由于直流配电网潮流计算不考虑电抗,故其节点导纳矩阵 Y 为纯电导阵 G ,若节点 i 、 j 之间支路电导为 g_{ij} 时,矩阵中各元素为

$$\begin{cases} G_{ii} = \sum_{\substack{j=0, \\ j \neq i}}^n g_{ij} \\ G_{ij} = -g_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

则节点 i 注入电流为

$$I_i = \sum_{\substack{j=0, \\ j \neq i}}^n g_{ij}(U_i - U_j) = U_i \sum_{\substack{j=0, \\ j \neq i}}^n g_{ij} - \sum_{\substack{j=0, \\ j \neq i}}^n g_{ij} U_j \quad (7)$$

节点 i 注入功率 P_i 为

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n G_{ij} U_j \quad (8)$$

可得节点 i 第 k 次迭代的功率不平衡量

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i - P_i^{(k)} \quad (9)$$

此时的雅克比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \cdots & H_{mm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} = U_i G_{ii} + I_i \quad (11)$$

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i G_{ij} \quad (12)$$

采用牛顿拉夫逊法进行潮流计算时的修正方程为

$$\Delta P^{(k)} = J^{(k)} \Delta U^{(k)} \quad (13)$$

第 $k+1$ 次迭代节点电压新值为

$$U^{(k+1)} = U^{(k)} + \Delta U^{(k)} \quad (14)$$

节点 i 、 j 间的支路功率损耗表示为

$$\Delta P_{ij} = (U_i - U_j)^2 G_{ij} \quad (15)$$

按照上述步骤循环迭代直至电压偏差 ΔU 小于预先设定好的收敛精度时迭代停止,本文取收敛精度为万分之一。由此可得直流系统的稳态潮流分布,进一步求解网络损耗、节点电压偏移等数据,为之后直流系统网络重构寻优提供所需参数。

3 考虑换流器传输裕度的直流配电网网架寻优目标函数

本文从3方面对直流配电网网架结构进行优化筛选,即网络损耗、换流器功率传输裕度以及电压偏差。

3.1 约束条件

1) 系统潮流约束。

$$f(P, U) = 0 \quad (16)$$

式中: P 、 U 分别为节点有功功率和节点电压。

2) 拓扑约束。

尽管直流配电网能够合环运行,但辐射状网络继电保护整定方便,故本文仍采用辐射状拓扑,即网络保持辐射状运行且无孤立节点。

3) 换流器容量和电流的上限约束。

$$\begin{cases} P_i \leq P_{i\max} \\ I_i \leq I_{i\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_i 和 I_i 分别表示实际经过换流器 i 的有功功率和电流; $P_{i\max}$ 和 $I_{i\max}$ 分别为换流器 i 对应的额定容量和额定电流。

4) 节点电压上下限约束。

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (18)$$

式中: $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 表示节点 i 规定的电压上下限值。

3.2 直流多目标目标函数

1) 直流配电网网损最小。

直流系统功率损耗主要包括线路功率损耗 P_{line} 、换流器VSC功率损耗 P_{VSC} 、DC-DC变换器功率损耗 P_{DC-DC}

$$P_{loss} = P_{line} + P_{VSC} + P_{DC-DC} \quad (19)$$

直流配电网网损小即上述各部分有功损耗之和最小,各部分损耗分别由上文潮流计算和换流

器损耗公式求出。

2) 换流器初始功率传输裕度最大。

直流配电网网架结构优化需使优化后换流站的初始功率裕度最大，以应对可能出现的功率不平衡时具有更好的调节能力。要调整换流器功率传输裕度需采用自适应的下垂控制系数。

采用自适应的下垂控制系数计算公式如下。

$$k^* = \begin{cases} \frac{\alpha k(I_{dc\max} - |I_{dc}|)}{I_{dc\max}}, & |I_{dc}| \geq I_{dcref} \\ \frac{\alpha k |I_{dc}|}{I_{dc\max}}, & |I_{dc}| < I_{dcref} \end{cases} \quad (20)$$

式中： α 是调节系数，取 3； k 是传统的下垂系数。

$$k = \frac{I_{dc\max}}{\beta(U_{dc\max} - U_{dcref})} \quad (21)$$

式中： β 为调节常数，取 0.75。

为防止 k^* 取值不当影响换流器的调节能力， k^* 需要满足

$$\begin{cases} k_{\min}^* \leq k^* \leq k_{\max}^* \\ k_{\min}^* = \frac{I_{dc\max} - |I_{dcref}|}{U_{dc\max} - U_{dcref}} \\ k_{\max}^* = 3k \end{cases} \quad (22)$$

式中： U_{dcref} 为换流器直流侧参考电压，取基准值 1 pu； $U_{dc\max}$ 为换流器电压最大值，一般取高于基准值 5%~10%^[24]，本文取高于 5% $I_{dc\max}$ 为允许通过换流器的最大电压，取同一功率电压基准值下 0.5 pu^[25]； I_{dcref} 是换流器的参考电流，由换流器各自的参考功率和参考电压决定。

由式(18)(19)得自适应下垂系数 k^* 同换流器电压电流的关系

$$k^* = \begin{cases} \frac{4(I_{dc\max} - |I_{dc}|)}{U_{dc\max} - U_{dcref}}, & |I_{dc}| \geq I_{dcref} \\ \frac{4|I_{dc}|}{U_{dc\max} - U_{dcref}}, & |I_{dc}| < I_{dcref} \end{cases} \quad (23)$$

为使换流器分担不平衡功率的能力最大，自适应下垂系数应在满足上下界限制条件下尽可能大。

3) 节点电压偏移小。

系统对节点电压的要求是令其相对额定值的偏移尽可能小，从而保证用电安全，提高用户电能质量，节点电压参考值 U_{ref} 为 1 时的对应 i 节点电压偏移函数为

$$U_{bias} = \frac{|U_{ref} - U_i|}{U_{ref}} \quad (24)$$

3.3 目标函数模糊化处理

由于不同寻优目标的量纲不同，在寻优过程

中对综合目标函数的影响大小也有所不同，因而需要对以下 3 个目标函数进行模糊化处理^[26]。

1) 有功网损模糊化。

有功网损模糊化即令系统总网损除以原网络联络开关均断开时的系统总网损，得到网损模糊指标 a 。由于网损越小对系统越有利，因而采用偏小型半梯形隶属函数，取网损降低率 40%，即模糊指标 a 下界 a_{\min} 取 0.6； k_1 、 k_2 为对应线性部分斜率与截距，分别为-2.5 和 2.5。网损减小时隶属值增大且最大为 1，网损增大时隶属值为 0，对应隶属函数如图 5 所示。

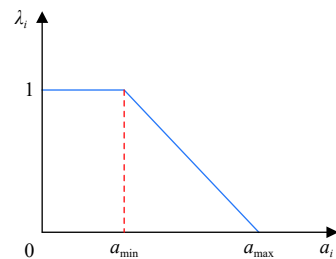


图 5 网损隶属函数

Fig. 5 Membership function diagram of network loss

对应隶属度为 λ_i 时隶属函数表达式为

$$\begin{cases} \lambda_i = 1, & 0 < a_i \leq a_{\min} \\ \lambda_i = k_1 a_i + k_2, & a_{\min} < a_i \leq a_{\max} \\ \lambda_i = 0, & a_i > a_{\max} \end{cases} \quad (25)$$

2) 换流器传输裕度模糊化。

考虑换流器传输裕度的下垂系数模糊化

$$b_i = \frac{1}{\min(k_i^*)} \quad (26)$$

式中： $\min(k_i^*)$ 为第 i 种方案换流站的最小自适应下垂系数，要使 k_i^* 在满足上下界限制下尽可能大，则 b_i 应在给定范围内尽可能小。采用修改后的偏小型帕累托隶属函数如图 6，隶属度指标 μ_i 为

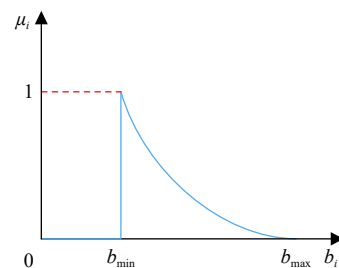


图 6 自适应下垂系数隶属函数

Fig. 6 Membership function diagram of adaptive droop coefficient

$$\begin{cases} \mu_i = 0, & 0 < b_i \leq b_{\min} \\ \mu_i = (b_i/b_{\min})^{-2}, & b_{\min} < b_i \leq b_{\max} \\ \mu_i = 0, & b_i > b_{\max} \end{cases} \quad (27)$$

式中： b_{\min} 即上文中 $\frac{1}{k_{\max}^*}$ ，而 b_{\max} 即上文中 $\frac{1}{k_{\min}^*}$ 。

3) 节点电压偏移模糊化。

节点电压偏移函数取 $c_i = \max|U_{\text{bias}}|$ ，采用降半正态隶属函数如图7所示。

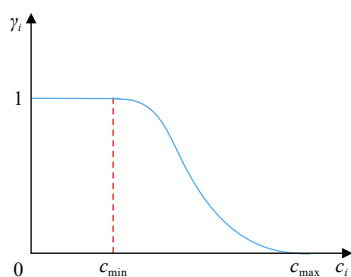


图7 节点电压偏移隶属函数

Fig. 7 Membership function diagram of nodal voltage deviation

隶属度指标具体求解方法如下：

$$\begin{cases} \gamma_i = 1, & 0 < c_i \leq c_{\min} \\ \gamma_i = e^{-\frac{(c_i - c_{\min})^2}{2\sigma^2}}, & c_{\min} < c_i \leq c_{\max} \\ \gamma_i = 0, & c_i > c_{\max} \end{cases} \quad (28)$$

在取节点电压偏移的上下界 c_{\min} 、 c_{\max} 时，由于直流配电网电压质量通常较交流配电网更好，即电压偏差小，故取电压偏差下界为0.01 pu，上界取0.025 pu。正态分布参数 σ 由 3σ 准则取得。

由模糊化求得的隶属度函数与理想值求取欧氏距离^[26]，将各指标得到的隶属度抽象为三维空间中的一点。

定义优化指标隶属度同理想值之间的距离

$$D_1 = \sqrt{(\lambda_i - \lambda_i^+)^2 + (\mu_i - \mu_i^+)^2 + (\gamma_i - \gamma_i^+)^2} \quad (29)$$

定义优化指标隶属度与可接受下限值间的距离

$$D_2 = \sqrt{(\lambda_i - \lambda_i^-)^2 + (\mu_i - \mu_i^-)^2 + (\gamma_i - \gamma_i^-)^2} \quad (30)$$

定义优化指标最优隶属度同可接受下限值间的距离

$$D_3 = \sqrt{(\lambda_i^+ - \lambda_i^-)^2 + (\mu_i^+ - \mu_i^-)^2 + (\gamma_i^+ - \gamma_i^-)^2} \quad (31)$$

式中： λ_i^+ 、 λ_i^- 分别表示有功网损的理想隶属度值和可接受的下限值； μ_i^+ 、 μ_i^- 分别表示衡量换流器功率传输裕度的自适应下垂系数理想隶属度和可

接受下限； γ_i^+ 、 γ_i^- 则分别表示节点电压偏移理想隶属度与其下限值。

整体的综合适应度可用下式表示

$$\varphi = (D_1 + D_2) / (D_1 + D_3) \quad (32)$$

4 利用二进制粒子群算法的直流配电网网架结构寻优

粒子群算法是将配电网所有的重构结果抽象为一个搜索空间中的许多粒子，不同粒子间适应度值不同，即满足优化目标的程度不同，同时各自的速度向量和位置向量也不同。速度向量与位置向量是对初始随机生成的粒子按一定方向和速度进行寻优的两个要素。每一个粒子代表一种网架结构，其维数代表开关的数量，每个粒子按照以下的速度位置向量公式进行迭代：

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (P_{zdi}^t - x_i^t) + c_2 r_2 (P_{gdi}^t - x_i^t) \quad (33)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (34)$$

式中： ω 为非负惯性权重因子，用于表征上次迭代的速度向量对于本次迭代速度向量的影响大小，一般取为1；学习因子 c_1 、 c_2 一般均设为2； r_1 、 r_2 为[0,1]间的随机数； P_{zdi}^t 为第 i 个粒子第 t 次迭代的个体最优极值点，即第 i 种方案中在前 t 代搜索到的最优开关状态集合； P_{gdi}^t 为整个种群在第 t 次迭代后的全局最优点； x_i^t 为第 i 个粒子第 t 次迭代时的位置。

二进制粒子群算法(binary particle swarm optimization, BPSO)适用在离散空间寻优，此时速度向量表征的是粒子在此维度下取0或1的概率，二进制粒子群算法的位置更新公式为

$$\begin{cases} x_i^t = 1, & r < F(v_i^t) \\ x_i^t = 0, & r > F(v_i^t) \end{cases} \quad (35)$$

式中： $F(x)$ 为sigmoid函数，即 $F(v_i^t) = 1/(1+e^{-v_i^t})$ 。

采用二进制粒子群算法进行直流配电网网架寻优的求解过程如图8所示。

1) 输入直流配电网拓扑结构参数和节点电气量参数，按节点类型对节点及其参数进行重新编号排序。

2) 初始化二进制粒子群算法种群的个体，即网架结构中的开关状态，输入种群规模、迭代次数、学习因子、个体维度、初始位置、速度等。

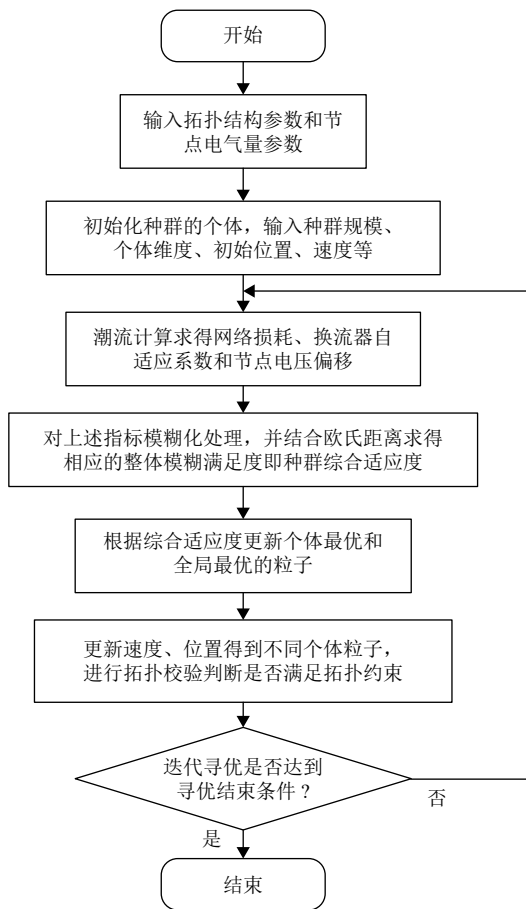


图 8 直流配电网网架寻优求解流程图

Fig. 8 Flowchart of optimal solution for DC distribution network frame

3) 对个体进行潮流计算并由上文公式求得此时的网络损耗、换流器自适应系数和最大的节点电压偏移。

4) 对上述的 3 个指标进行模糊化处理, 并结合欧氏距离求得相应的整体模糊满足度即种群综合适应度。

5) 根据综合适应度更新个体最优和全局最优的粒子。

6) 更新速度、位置得到不同个体粒子, 即不同的拓扑结构。进行拓扑校验判断是否满足拓扑约束。

7) 判断迭代寻优是否达到寻优结束条件, 若是则记录结果, 输出满足约束的最优拓扑方案, 否则返回 3) 重复迭代。

5 算例分析

5.1 算例模型及参数

本文采用修改后的 IEEE33 节点算例系统进

行验证, 节点 16 所连直流负荷设为节点 34, 则此系统由 34 个节点, 38 条支路组成, 系统额定电压 12 kV, 总负荷 3.195 MW, 其中 1 号节点通过 VSC 换流器 1 与交流电网相连, 节点 6、25、26 接光伏电源, 节点 13、24 分别通过换流器 2、3 与交流负荷相连, 节点 16 通过直流变压器接电压等级 6 kV 的直流负荷, 拓扑结构如图 9 所示。

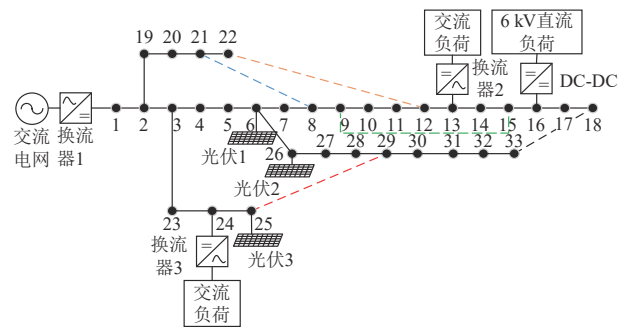


图 9 修改的 IEEE33 节点直流配电系统

Fig. 9 Modified IEEE 33-bus DC distribution system

将换流器 1 设为平衡节点; 换流器 2、3 采用下垂控制。为研究方便, 换流器 1 和 DC-DC 变换器采用简单损耗模型, 换流器 1 效率取 96%; 直流变压器效率取 98%。换流器 2、3 采用精确模型其损耗参数如表 1。

表 1 换流器精确损耗模型参数

Table 1 Parameters of converter's precise loss model

损耗指标	换流站2	换流站3
a_1	0.00066	0.0046
b_1	0.003	0.003
c_1	0.083	0.012

取功率基准值为 1 MVA; 电压基准值 12 kV; $I_{d\max}$ 为 0.0417 kA; 换流器 2 的下垂参考电流 $I_{d\text{ref}1}$ 为 0.0049 kA; 换流器 3 的下垂参考电流 $I_{d\text{ref}2}$ 为 0.0343 kA; 换流器传统下垂系数 k 为 0.092; 粒子群算法学习因子 c_1 、 c_2 均取 2; 进化代数取 30; 种群规模取 80。

节点及线路参数详见附录, 各节点初始电压均设为标幺值 1。

5.2 算例验证

分析系统中 5 个环的所有开关组合方案, 共得到 86240 种组合结果, 其中除去不符合辐射状拓扑约束条件的方案共有 50751 种, 通过顺序枚举法可得到所有满足拓扑约束的重构方案及其对应的综合适应度分布如图 10。

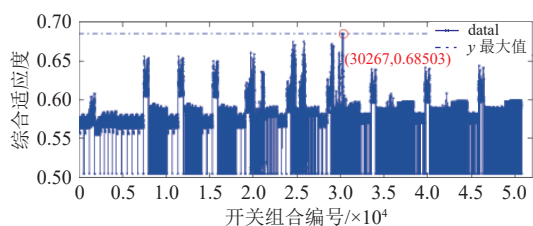


图 10 枚举法所得所有方案适应度分布
Fig. 10 Fitness distribution of all schemes obtained by enumeration method

整体满足度最大的是第 30267 种方案，最大适应度为 0.68503，取寻优前、寻优后及适应度较高的 2 种典型方案以及不考虑换流器功率传输裕度时所得方案，共 5 种对比分析，得到其目标函

数指标如表 2 所示。

由表 2 可知方案 2 最低节点电压相较其他方案高，但最大节点电压偏移大，节点间电势差大，引起网损增加，比优化后结果增加了 1.7%，使得综合适应度较差；方案 3 最小的自适应下垂系数较大，即不平衡功率调节能力较强，但电压偏差大，最大电压偏差比优化后结果大 71.9%，电能质量不及重构后结果，因而综合适应度也不高。若不考虑换流器功率传输裕度，得到寻优结果电压偏移小，网损也比其他方案低，但最小自适应下垂系数小，调节不平衡功率能力差，故在直流配电网寻优中引入换流器自适应下垂系数目标函数是必要的。

表 2 寻优结果对比
Table 2 Comparison of optimizing results

方案	断开开关	网损/kW	最小自适应下垂系数	最低节点电压/pu	最大电压偏差量/kV	综合适应度
优化前	8-21、9-15、12-22、18-33、25-29	152.016	0.16728	0.96836	0.37966	0.58479
优化后	7-8、10-11、13-14、26-27、8-21	144.952	0.16531	0.98367	0.19601	0.68503
方案2	10-11、14-15、28-29、31-32、8-21	147.481	0.16498	0.98558	0.30031	0.57644
方案3	7-8、9-10、14-15、28-29、32-33	148.199	0.16555	0.98297	0.33694	0.57441
不考虑裕度	7-8、10-11、13-14、26-27、32-33	141.036	0.15889	0.98933	0.19361	—

对比 5 种方案并结合公式 (23) 得，在系统总体的电压水平较高时，由于 $|I_{dc}|$ 增大，当 $|I_{dc}| \geq I_{dcref}$ 时，自适应下垂系数 k^* 减小。经过算法寻优后即表中优化后的重构结果综合网损以及节点电压偏移均比其他方案低，网损相较优化前减小了约 4.6%，同时与不考虑传输裕度时相比，网损相近，仅升高了 2.7%，最大电压偏差增大了 1.2%，而最小自适应下垂系数增大了约 4.0%，实现了优化网损、节点电压的同时提高换流器功率传输裕度。

5 种方案各节点电压的分布如图 11 所示。由图 11 知优化前各节点电压水平较差，偏离

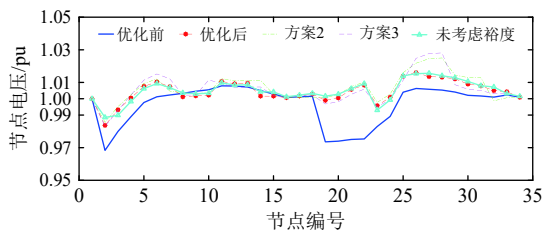


图 11 5 种方案节点电压分布
Fig. 11 Distribution of nodal voltage of five schemes

标么值 1 较多，优化后的各节点电压最接近于 1 且相互之间的电位差最小，即优化后所得拓扑节点电压分布优于其他方案，且与不考虑传输裕度时得到的拓扑方案节点电压分布情况接近。

相应的各节点电压偏差有名值如图 12 所示。对比方案 2 和方案 3 在某些节点处的电压偏

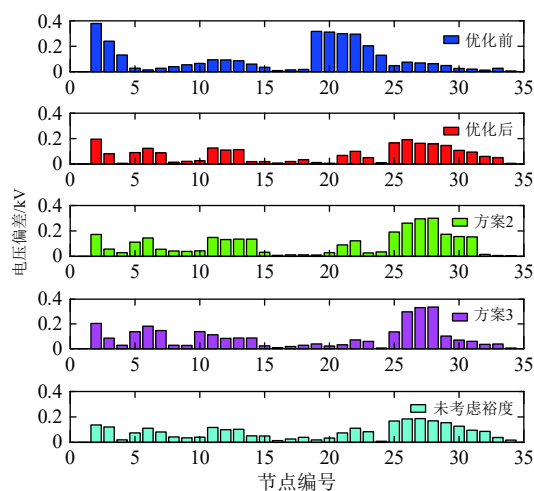


图 12 5 种方案电压偏差分布
Fig. 12 Distribution of voltage deviation of five schemes

移较小，但整体电压偏差水平仍较大，而优化后系统的整体电压偏差更小，进一步证明了寻优算法的有效性。

优化后各节点间电压偏差减小，各支路损耗也相应减小，使得系统总网损降低。同时优化后线损与不考虑换流器功率传输裕度时的线损接近，5种网架结构对应的支路损耗如图13所示。

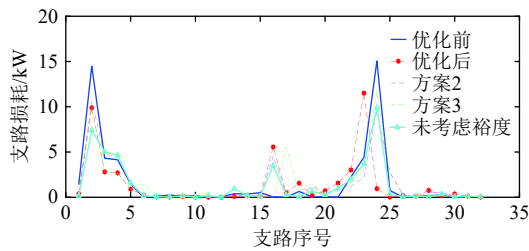


图 13 5种方案支路损耗分布

Fig. 13 Distribution of branch loss of five scheme

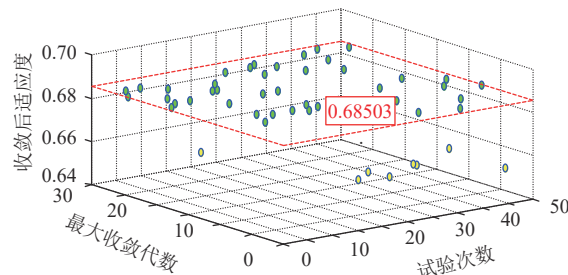


图 14 50次实验收敛情况散点

Fig. 14 Scatter diagram of the convergence situation during 50 times of experiments

2) 采用本文所提算法可得到在网络损耗、节点电压偏移、换流器功率传输裕度方面综合最优的网架结构。

3) 尽管受限于粒子群算法收敛性能，本文所提算法仍能较为准确地收敛至全局最优，但收敛代数较多，后续可对算法性能做进一步改进。

(本刊附录请见网络版，印刷版略)

参考文献

- [1] 韩民晓, 谢文强, 曹文远, 等. 中压直流配电网应用场景与系统设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 2-14, 89. HAN Minxiao, XIE Wenqiang, CAO Wenyuan, *et al.* Application scenarios and system design of medium-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 2-14, 89(in Chinese).
- [2] 苏宜靖, 胡列翔, 许烽, 等. 柔性直流配电网系统操作过电压的研究[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3196-3203. SU Yijing, HU Liexiang, XU Feng, *et al.* Research on

利用上文中所提到的考虑自适应下垂系数的模糊化二进制粒子群的算法进行50次试验之后得到的收敛代数及适应度散点图如图14所示。

在50次试验中正确寻优的次数为42次，由于粒子群算法自身局限容易陷入局部最优^[27]，有8次未收敛到最优值，平均收敛代数16.34。

6 结论

本文通过比较由枚举法所得的最大综合适应度方案与寻优算法的结果，验证了本文算法的正确性，并得出如下结论：

1) 自适应下垂系数并不随网络中节点电压大小单向变化，若不考虑换流器功率传输裕度，则电压偏移和网损较小，但换流器自适应下垂系数小，调节不平衡功率能力差。

switching overvoltage in flexible DC distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3196-3203(in Chinese).

- [3] 马钊, 焦在滨, 李蕊. 直流配电网架构与关键技术[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3348-3357. MA Zhao, JIAO Zaibin, LI Rui. Network structures and key technologies of DC distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3348-3357(in Chinese).
- [4] 李国庆, 边竞, 王鹤, 等. 直流电网潮流分析与控制研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1067-1078. LI Guoqing, BIANJing, WANG He, *et al.* Review on DC grids power flow analysis and control[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1067-1078(in Chinese).
- [5] 陈鹏伟, 肖湘宁, 唐松浩, 等. 交直流混合配电网区间潮流等效算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 979-992. CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, TANG Songhao, *et al.* An equivalent algorithm of interval power flow applied to AC/DC hybrid distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 979-992(in Chinese).

- [6] 彭克, 张新慧, 陈羽. 适用于多端柔性互联的交直流配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 22-27.
PENG Ke, ZHANG Xinhui, CHEN Yu. Power flow calculation algorithm for AC-DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 22-27(in Chinese).
- [7] 郑涛, 吴琼, 吕文轩, 等. 基于主动限流控制的直流配电网保护及故障隔离方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 114-121, 282-289.
ZHENG Tao, WU Qiong, LV Wenxuan, *et al.* VSC based power flow calculation of multi-terminal DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 114-121, 282-289(in Chinese).
- [8] 王守相, 刘琪, 薛士敏, 等. 直流配电系统控制与保护协同关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 23-30.
WANG Shouxiang, LIU Qi, XUE Shimin, *et al.* Key technologies and prospect for coordinated control and protection in DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 23-30(in Chinese).
- [9] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, *et al.* Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049(in Chinese).
- [10] 孙孔明, 陈青, 赵普. 考虑环网检测的配电网拓扑重构遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 64-71.
SUN Kongming, CHEN Qing, ZHAO Pu. Genetic algorithm with mesh check for distribution network topology reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 64-71(in Chinese).
- [11] 葛少云, 张有为, 刘洪, 等. 考虑网架动态重构的主动配电网双层扩展规划[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1526-1536.
GE Shaoyun, ZHANG Youwei, LIU Hong, *et al.* Bi-layer expansion programming method for active distribution network considering dynamic grid reconfiguration[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1526-1536(in Chinese).
- [12] 解大, 陈爱康, 喻松涛, 等. 基于下垂控制的柔性直流配电网综合调度指标和调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2828-2840.
XIE Da, CHEN Aikang, YU Songtao, *et al.* Research on synthetic scheduling index and scheduling strategy of multiport flexible DC distribution network with droop-control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2828-2840(in Chinese).
- [13] 和敬涵, 李智诚, 王小君, 等. 计及换流器损耗与电压下垂控制的交直流系统最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 48-55.
HE Jinghan, LI Zhicheng, WANG Xiaojun, *et al.* Optimal power flow algorithm for hybrid AC/DC power systems considering power loss of converter and voltage-droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 48-55(in Chinese).
- [14] 王玉宝. 交直流混合配电网网络重构方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [15] 张释中, 裴玮, 杨艳红, 等. 交直流混合配电网结构优选和设备容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2766-2777.
ZHANG Shizhong, PEI Wei, YANG Yanhong, *et al.* Optimization of AC/DC hybrid distribution network structure and equipment capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2766-2777(in Chinese).
- [16] 刘飞, 熊晓琪, 查鹏程, 等. 直流配电网网架结构与分布式光伏多目标协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3754-3765.
LIU Fei, XIONG Xiaoqi, ZHA Pengcheng, *et al.* Multi-objective collaborative optimization for DC distribution network configuration and distributed photovoltaic[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3754-3765(in Chinese).
- [17] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, *et al.* Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73(in Chinese).
- [18] 彭乔, 刘天琪, 张英敏, 等. 考虑功率裕度与系统稳定性的直流电网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3498-3506.
PENG Qiao, LIU Tianqi, ZHANG Yingmin, *et al.* Adaptive droop control of VSC based DC grid considering power margin and system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3498-3506(in Chinese).
- [19] CHEN Xinglei, LI Wenchen, SUN Lu, *et al.* Power flow algorithm of DC distribution network with distributed energy access[C]//International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, 2018: 2414-2419.
- [20] 都嘉慧, 王长江, 李凌, 等. 计及换流器损耗的风电经柔直并网系统的随机最优潮流模型[J]. 中国电力, 2020,

- 53(5): 77–88.
DU Jiahui, WANG Changjiang, LI Ling, *et al.* Stochastic optimal power flow of wind turbine through flexible grid connected system considering converter loss[J]. *Electric Power*, 2020, 53(5): 77–88(in Chinese).
- [21] 郭敬梅, 余超耘, 黄辉. 考虑VSC-MTDC动态稳定性约束的优化协调控制策略[J]. *高电压技术*, 2018, 44(7): 2181–2188.
GUO Jingmei, YU Chaoyun, HUANG Hui. Optimalco-ordinated control strategy considering VSC-MTDC dynamic stability constraints[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(7): 2181–2188(in Chinese).
- [22] YU Chenyen, TAMURA Jun, LORENZ RobertD. Optimum DC bus voltage analysis and calculation method for inverters/motors with variable DC bus voltage[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, 49(6): 2619–2627.
- [23] 吴红斌, 杨超, 陈煜, 等. 基于电压源型换流器的多端直流配电网潮流计算[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(11): 79–85, 93.
WU Hongbin, YANG Chao, CHEN Yu, *et al.* VSC based power flow calculation of multi-terminal DC distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(11): 79–85, 93(in Chinese).
- [24] 陈迅, 郭敬梅, 曾德辉, 等. 考虑直流侧响应的VSC-MTDC系统协调控制[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(12): 174–180.
CHEN Xun, GUO Jingmei, ZENG Dehui, *et al.* Coordinated control of VSC-MTDC system considering DC-side response[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(12): 174–180(in Chinese).
- [25] 李智诚. 交直流柔性互联电网最优潮流与自愈重构研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [26] 赵嘉玉, 韩肖清, 梁琛, 等. 隶属函数与欧氏距离相结合的配电网优化重构[J]. *电网技术*, 2017, 41(11): 3624–3631.
ZHAO Jiayu, HAN Xiaoqing, LIANG Chen, *et al.* Optimaldistribution network reconfiguration combining fuzzy membership with Euclidean distance[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 3624–3631(in Chinese).
- [27] 董志辉, 林凌霄. 基于改进模糊C均值聚类时段划分的配电网动态重构[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2299–2305.
DONG Zhihui, LIN Lingxue. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved fuzzy C-means clustering of time division[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2299–2305(in Chinese).

收稿日期: 2021-02-02

作者简介:

柴睿(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: chairui917@163.com;

王磊(1985), 男, 博士, 讲师, 通信作者, 研究方向为电力电子变换器及其控制策略, E-mail: tywanglei1985@126.com;

韩肖清(1964), 女, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: hanxiaoqing@tyut.edu.cn;

王金浩(1975), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: 7wjh@163.com;

李胜文(1986), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: lsw242@126.com;

张馨方(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: 765563177@qq.com。

附录 A

附表 A1 修改的 IEEE33 节点直流系统参数 (负荷为负代表节点所连光伏电源的额定有功出力)

支路编号	首节点	末节点	支路电阻/p.u	末节点有功负荷/kW
1	1	2	0.01	100
2	2	3	0.75	90
3	3	4	0.366	120
4	4	5	0.3811	60
5	5	6	0.819	-120
6	6	7	0.1872	200
7	7	8	0.7114	200
8	8	9	1.03	60
9	9	10	1.044	60
10	10	11	0.1966	45
11	11	12	0.3744	10
12	12	13	1.468	60
13	13	14	0.5416	120
14	14	15	0.5910	60
15	15	16	0.7463	60
16	16	17	1.289	60
17	17	18	0.732	90
18	2	19	0.164	90
19	19	20	1.5042	90
20	20	21	0.4095	90
21	21	22	0.7089	90
22	3	23	1.7	90
23	23	24	0.798	420
24	24	25	0.476	-900
25	6	26	0.203	-50
26	26	27	0.2842	60
27	27	28	1.059	60
28	28	29	0.8042	120
29	29	30	0.5075	200
30	30	31	0.9744	150
31	31	32	0.3105	210
32	32	33	0.3410	60
33	8	21	2	/
34	9	15	2	/
35	12	22	2	/
36	18	33	0.5	/
37	25	29	0.5	/
38	16	34	0.4	70