

交直流配电网供电恢复问题的半定规划方法研究

吕东麟¹, 韩蓓¹, 汪可友¹, 李国杰¹, 张利军², 徐晨博², 孙轶恺²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;
2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 随着电力电子元件的发展, 柔性直流技术已经逐步趋于成熟。在传统交流配电网中加入柔性直流换流装置, 建立了交直流混联配电系统, 并基于短路故障后的供电恢复问题, 应用半定规划方法来实现快速的系统供电恢复方案。通过 VSC 模型进行等效, 提出了一种基于模型参数的 VSC 换流站的等效方式, 并进一步在交直流混联系统中进行潮流优化。通过 IEEE33 节点的改进辐射网及环网算例进行计算, 并进行不同等效方式的计算分析, 验证了该等效方法的合理性及高效性。

关键词: 供电恢复; 半定规划; 柔性直流; 交直流配电网; VSC 模型等效

Semi-definite programming method for power supply restoration of AC/DC distribution network

LÜ Donglin¹, HAN Bei¹, WANG Keyou¹, LI Guojie¹, ZHANG Lijun², XU Chenbo², SUN Yikai²

(1. School of Electric Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Hangzhou 310000, China)

Abstract: With the development of power electronic components, flexible DC technology has gradually been developed. In this paper, a flexible AC-DC converter is added to the traditional AC distribution network to establish an AC-DC hybrid distribution system, and based on the problem of power restoration after short trouble, a semi-definite programming method is applied to realize a fast system power restoration scheme. Firstly, with the structure of VSC model, this paper proposes an equivalent method of VSC converter station based on model parameters, then conducts power flow optimization in AC/DC hybrid system. Then, it uses the algorithm in radial and ring structured hybrid network developed from IEEE 33 nodes respectively, and the calculation and analysis of different equivalent methods are carried out to validate the rationality and high efficiency of the equivalent method.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050102) and Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company (No. 5211JY16000X).

Key words: power restoration; semi-definite programming; flexible DC technology; AC/DC distribution network; VSC model equivalence

0 引言

随着新型清洁能源的接入和分布式电源的开发, 直流配电网将更加适用于未来城市配电网的发展需求。同时, 电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)等电力电子设备的造价和损耗逐渐降低, 目前已经日益广泛地应用于配电系统。采用交直流混合配电网的形式, 省略了许多涉及直流负荷的变换环

节和变换装置, 提高了整个系统的经济性和可靠性, 是一种可行的智能配电网过渡模式^[1-3]。在常见的交直流算例模型中, 对于换流站的等效方式, 一般采用双端发电机等效^[4]、直流侧附加等效^[5]和网络参数等效^[6]。但双端发电机等效精度不高, 其他等效方式精准, 但模型较为复杂, 求解速度有待提升。

供电恢复作为配电网故障自愈系统的最后一环, 对于提高配网供电可靠性具有重要的意义。由于供电恢复问题是一类复杂的非线性最优化问题, 具有多段、多约束、多变量、多组合、多目标的特点。因此, 对算法及模型的设定, 均有较高的要求。

以往的供电恢复优化, 通常应用数学优化方法、启发式搜索方法以及智能算法来实现单目标或多目标的优化计算: 最早在 1987 年, 文献[7]建立了分阶段配电网负荷的二次规划模型, 使用递归二次规划来求解故障恢复问题; 启发式搜索方法大多是基于开关操作。在搜索的过程中依据问题本身特性, 确定启发性信息的方向, 使之朝着最优解的方向优化。一些文献^[8-9]借助于配电网呈辐射性树状的拓扑结构, 基于图论中二叉树、最小生成树的启发式搜索方法进行求解, 但这种方法的求解速度较为缓慢, 效率不高; 近年来各类智能算法逐渐被用于该领域。例如采用二进制粒子群算法搜索 Pareto 非支配解获得供电恢复方案^[10], 或应用无重访遗传算法(NSGA-II)进行配电网多目标重构问题的求解^[11]; 但遗传算法均具有易陷入局部最优的缺点, 且部分智能算法求解速度虽有了提高, 但仍未满足系统实际需要, 柔性互联装置具有较快的响应特性, 当系统故障时可以快速地进行处理, 如算法不能快速地求解, 则在一定程度上会产生偏差。因此在交直流混联系统中, 要求算法在供电恢复的求解响应速度方面要尽可能提高, 对模型的求解效率提出了新的挑战。

半定规划(Semi-Definite Programming, SDP)属于凸优化的一种, 经过近十年的快速发展, 已成为目前数值最优化领域的研究热点。其理论研究已逐渐成熟, 已经逐步应用于机组组合^[12]、状态估计^[13]等领域。基于准对角矩阵的内点半定规划稀疏技术具有超线性收敛性, 可以有效提高优化计算的存储效率和计算性能, 极大程度上减少了计算时间。为尽可能提高供电恢复效率, 本文根据交直流配电网的特点、换流站的内部结构及换流特性, 首先根据半定规划的基本形式, 进行了柔性直流换流器的含模型参数等效, 并根据等效方式, 提出了交直流系统的供电恢复优化模型; 其次根据供电恢复的基本概念, 给出了应用原始对偶内点法的求解流程; 最后, 在基于 IEEE33 节点的改造算例上进行分析验证, 分别根据不同拓扑的网络进行恢复计算, 并根据本文提出的等效方式, 进行精度及效率对比, 验证所提模型的正确性和有效性。

1 考虑 VSC 模型参数等效的半定规划模型

1.1 半定规划一般形式

半定规划是线性规划的推广, 是在满足约束对称矩阵的仿射组合半正定的条件下求取线性函数极值的问题, 属于特殊的锥优化, 可以视为线性规划的推广。半定规划中的约束是非线性、非光滑的凸函数, 因而属于凸规划问题, 能够保证解的全局最

优性。同时, 采用稀疏技术能够大幅度提高存储效率和计算性能, 应用 SDP 来求解优化问题, 计算时间最多可减少 92%^[14]。应用半定规划去求解供电恢复问题, 可以在一定程度上满足系统高速响应, 以及及时恢复各失电节点所需的功率要求, 快速地恢复失电负荷。与其他智能算法相比较具有一定的效率优势。由于半定规划约束的特性, 某些非线性规划问题能够等价地转换为半定规划问题。电力系统的模型经变形后可以采用工具包直接进行优化。整体优化模型结构如下:

$$\begin{cases} \min A_0 \cdot X \\ \text{s.t. } A_i \cdot X = b_i, i=1, \dots, n \\ X \succeq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: “ \cdot ” 表示矩阵的迹, 即 $A \cdot X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij}$,

其中变量 X 以矩阵的形式来表达, $X \in R^{n \times n}$, $X \succeq 0$ 表示矩阵 X 为半正定的矩阵, 向量的非负性以矩阵的非负定性取代; A_0 则表示优化模型的目标系数矩阵; A_i 为优化模型的第 i 个约束; b_i 为某一确定实值。

交直流混联系统的优化中, 与交流系统不同, 优化变量既要考虑交流侧, 也要考虑与 VSC 连接的交流侧电压、功率变量, 以及直流侧电压、电流变量, 及直流线路的约束, 故矩阵 A 的稀疏程度较高。

1.2 VSC 功率特性

VSC 具有独立有功和无功功率控制的灵活特性^[15], 在含 VSC 的交直流混联系统中, 必须选择一端 VSC 控制其直流侧电压, 充当整个直流网络的有功功率平衡换流器; 另一端的 VSC 则进行该端有功功率的控制。常用的控制模式如表 1 所示^[16], 当交流侧发生故障时, 需将其控制模式切换为 Vf 控制, 以保证非故障失电区域的节点电压稳定, 因在配电网供电恢复稳态分析中, 非故障侧的 $V_{dc}Q$ 控制可等效处理为 PQ 控制^[17], 则 SOP 的可控变量包括: 非故障侧换流器 VSC 输出的有功功率 P 和无功功率 Q 、故障侧换流器 VSC 输出的电压 U 。在故障前通过潮流计算得出交直流节点的功率及电压值, 并加以限制。

表 1 B2B VSC 控制模式

Table 1 B2B VSC control mode

控制模式	VSC1	VSC2	适用场景
	控制方式	控制方式	
1	PQ 控制	$V_{dc}Q$ 控制	正常运行
2	$V_{dc}Q$ 控制	PQ 控制	正常运行
3	Vf 控制	$V_{dc}Q$ 控制	VSC1 侧发生故障
4	$V_{dc}Q$ 控制	Vf 控制	VSC2 侧发生故障

本文根据VSC拓扑结构^[6]来设计考虑内部模型参数的等效模型,并将其应用于配电网含VSC的供电恢复数学模型当中。VSC换流站的模型如图1所示,交流潮流经变压器、换流阻抗及晶闸管作用来实现交直流的互换。假设交流系统流入VSC的电压相量为 $U_s = U_s \angle \theta_s$, VSC输出的电压相量为 $U_c = U_c \angle \theta_c$,换流器内部损耗和换流变压器损耗的等效电阻为 R ,换流变压器阻抗为 jX_L 。交流系统流入换流变压器的有功和无功功率分别为 P_s 和 Q_s ,流入换流桥的有功和无功功率分别为 P_c 和 Q_c ,其中流过换流变压器的电流为 I_{ac} ,有功功率经VSC内部损耗后,以 P_c 的功率通过直流线路传输,VSC处直流电压设定为 U_{DC} ,直流线路电流为 I_{DC} 。

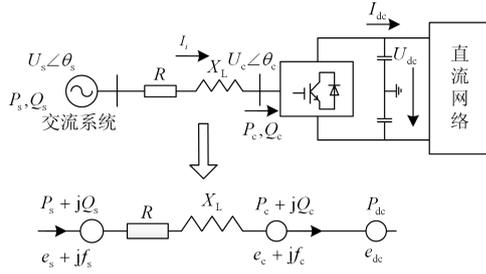


图1 VSC-HVDC 模型

Fig. 1 VSC-HVDC model

由于VSC的换流桥臂的损耗已经由 R 等效,因此直流功率 P_{DC} 应该与注入换流桥的功率相等,因此可得 $P_{DC} = P_c = U_{DC} \cdot I_{DC}$ 。由于VSC的换流桥臂的损耗已经由 R 等效,因此直流功率 P_d 应该与注入换流桥的功率相等,因此可得 $P_c = P_d$,式中 U_{dc} 、 I_{dc} 分别为直流节点的直流电压和电流。直流电压 U_{DC} 与 U_c 成比例关系,为 $U_{ci} = kM_i U_{di}$,即以 M 表征为VSC的调制度,可设置为一常数,在直角坐标系下整理为 $e_{ci}^2 + f_{ci}^2 = k^2 M_i^2 e_{di}^2$, $f_{di} = 0$ 。逆变侧功率经VSC传输,等式约束与整流侧相同。以上各式共同构成了VSC的基本稳态模型。

1.3 半定规划中的VSC模型转化

为了满足半定规划方法下的计算需求,避免产生三角函数,需将整体模型进行二次型的凸变换。交流复数部分需将节点电压整理为直角坐标系下的形式,即 $\dot{U}_i = U_i e^{j\theta_i}$ 写作 $\dot{U}_i = e_i + jf_i$,与节点电压相关的约束写为实部、虚部的二次函数形式,故潮流平衡方程写作式(2)、式(3)的形式。

$$\begin{cases} P_{Gi} - \sum_{j \in S_B} [e_i(e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i(f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] = C_i P_{Di} \\ i \in S_B \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_{Ri} - \sum_{j \in S_B} [f_i(e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) - e_i(f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] = C_i Q_{Di} \\ i \in S_B \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{Gi} - \sum_{j \in S_B} [e_i(e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i(f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] + \text{spk} P_d = C_i P_{Di}, i \in S_B \quad (4)$$

$$Q_{Ri} - \sum_{j \in S_B} [f_i(e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) - e_i(f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] + \text{spk} \tan \phi P_d = C_i Q_{Di}, i \in S_B \quad (5)$$

$$P_{Gi} - \sum_{j \in S_B} [e_i(e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i(f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] + \text{spk} P_d = C_i P_{Di}, i \in S_B \quad (6)$$

$$Q_{Ri} - \sum_{j \in S_B} [f_i(e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) - e_i(f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] = C_i Q_{Di}, i \in S_B \quad (7)$$

式(4)~式(7)为与VSC连接的节点潮流平衡方程, C_i 为第 i 个失电节点的恢复系数。在SOP与两侧交流节点连接时,不同侧的VSC控制方式有所不同:式(4)、式(5)为PQ控制方式下,与VSC直流节点侧连接的交流节点潮流平衡方程,式(6)、式(7)为定VdcQ控制方式下交流节点潮流平衡方程。其中 P_{Gi} 表示输入节点 i 的有功功率, Q_{Gi} 表示输入节点 i 的无功功率, P_{Di} 、 Q_{Di} 分别表示第 i 个节点所需的有功、无功负荷, G_{ij} 为节点 i 和节点 j 间的电导, B_{ij} 为节点 i 和节点 j 间的电纳。spk为有功功率的流入/流出方向,在整流侧 $\text{spk} = 1$,在逆变侧 $\text{spk} = -1$ 。

1.2节中VSC的等效模型中涉及VSC换流器内部的功率损耗,现将其进行一定量的放缩^[18]。经换流器换流后得到直流电压 U_{DCr} 。有功功率及无功功率损耗分别为: $P_c = P_s - \text{real}((R + jX_L)I_i \cdot I_i^*)$, $Q_c = Q_s - \text{imag}((R + jX_L)I_i \cdot I_i^*)$ 。

在SOP中,换流站模型中不涉及节点功率、负荷计算,由线路连接同时电容器并联,线路间可视为一阻抗损耗 R_{SOP} ,故可单独设置直流侧变量 U_{dc} 及 I_{dc} ,且 $e_c^2 + f_c^2 = U_{dc}^2$ 。为满足直流侧变量约束中,涉及直流功率,以及线路电流与节点电压相加、相乘的格式,故将直流部分变量分别写作向量 $x_p = (P, d)^T$, $x_q = (Q, d)^T$, $x_d = (U_{dr}, U_{di}, I_d, d)^T$,同样的,设置 $d = 1$ 为常数。直流部分功率变量矩阵块为: $x_p \cdot x_p^T = \begin{bmatrix} P^2 & Pd \\ Pd & d^2 \end{bmatrix}$, $x_q \cdot x_q^T = \begin{bmatrix} Q^2 & Qd \\ Qd & d^2 \end{bmatrix}$,同时,直流侧电压电流的变量矩阵块为

$$\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_d^T = \begin{bmatrix} U_{DCr}^2 & U_{DCr}U_{DCi} & U_{DCr}I_{DCi} & U_{DCr} \cdot d \\ U_{DCi}U_{DCr} & U_{DCi}^2 & U_{DCi}I_{DC} & U_{DCi} \cdot d \\ U_{DCi}I_{DC} & U_{DCi}I_{DC} & I_{DC}^2 & I_{DC} \cdot d \\ U_{DCr} \cdot d & U_{DCi} \cdot d & I_{DC} \cdot d & d^2 \end{bmatrix}.$$

2 基于半定规划的供电恢复模型

2.1 供电恢复模型研究

配电网供电恢复问题重点关注故障切除后, 网络的某种最优运行状况, 通常需要权衡考虑系统中的各项恢复指标, 是一个多目标的优化问题。目前的供电恢复优化方案, 首要任务是保障系统能够安全稳定地运行, 对非故障失电区域提供一定功率来进行恢复。

在进行功率恢复的同时, 为保证电能质量, 使系统在方案下可以经济、高效地运行, 需要降低线路上的损耗; 为延长配电网中联络开关的使用寿命, 尽可能减少其操作次数; 在重构后的网络中, 系统可靠性有可能变差, 随着网架结构的改变, 其均匀性也会发生改变, 进而对系统的网损和可靠性产生影响。目前的供电恢复问题通常选择以最大化负荷恢复为基础, 结合失电区域损耗最小、开关操作次数最小、系统可靠性及均匀性最高相结合的优化目标。本文在功率恢复的基础上, 做了联络开关操作次数及系统可靠性固定的简化, 采用故障区域恢复功率最大化及有功损耗最小作为交直流供电恢复优化的目标函数, 如式(8)所示。

$$\max f(x) = \sum_{i=1}^{S_{\text{loss}}} C_i P_i^{\text{load}} - P_{\text{loss}} \quad (8)$$

优化调度方案的优化变量选择系统中各节点的供电恢复程度及节点电压值, 目标函数中的供电功率恢复情况表示为节点所需有功负荷及恢复系数乘积的形式, 即每个节点恢复功率为 $C_i P_i^{\text{load}}$; S_{loss} 为系统中失电区域节点集合, 即 $i, j = 1, \dots, n_{\text{loss}}$; P_{loss} 为失电区域的有功损耗, 写为

$$P_{\text{loss}} = - \sum_{i \in S_{\text{loss}}} \sum_{j \in S_{\text{loss}}} \mathbf{G}_{ij} [(f_i - f_j)^2 + (e_i - e_j)^2] \quad (9)$$

式中: f_i 、 f_j 为节点 i 与 j 电压值的实部值; e_i 、 e_j 为节点 i 与 j 电压值的虚部值; \mathbf{G}_{ij} 为支路 ij 间的电导值。为方便半定规划的优化计算, 将上式进一步展开整理, 记作电压实部、虚部与电导、电纳值分别相乘的形式, 为

$$P_{\text{loss}} = - \sum_{i=1}^{n_{\text{loss}}} [2(f_i^2 + e_i^2) \sum_{j=1}^{n_{\text{loss}}} (\mathbf{G}_{ij} - \mathbf{G}_{ji}) + 4 \sum_{j=i+1}^{n_{\text{loss}}} (f_i f_j + e_i e_j) \mathbf{G}_{ij}] \quad (10)$$

同时, 供电恢复的方案需要满足潮流约束、线路约束等多个等式、不等式约束条件, 在交直流混合配电网中, 交流节点潮流约束为式(2)、式(3), 与VSC连接的节点的潮流平衡约束为式(4)~(7)。同时, 直流节点涉及换流过程, 对于整流器及逆变器中直流节点, 有电压及直流线路功率约束方程:

$$U_{DCr} \cdot I_{DC} = P_{DCr} \quad (11)$$

$$P_{DCi} = U_{DCi} \cdot I_{DC} \quad (12)$$

$$U_{DCr} - U_{DCi} - I_{DC} \cdot R = 0 \quad (13)$$

双侧换流站约束包括容量约束、运行方式约束等。式中, S_{VSC} 为换流站极限接入容量, $P_{DCi/DCr}$ 、 $U_{DCr/DCi}$ 分别为整流/逆变侧节点功率、电压, 实际情况视故障点而定; P_{DC} 、 U_{DC} 分别为故障前换流站中流入的功率及电压值。

$$P_c^2 + Q_c^2 \leq S_{\text{VSC}}^2 \quad (14)$$

$$P_{DCi/DCr} = P_{DC} \quad (15)$$

$$U_{DCr/DCi} = U_{DC} \quad (16)$$

不等式约束包括电机出力约束及节点电压约束:

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (17)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad (18)$$

式(17)、式(18)为电源出力约束条件, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为系统中第 i 台发电机输出的有功、无功功率, $P_{Gi \min}$ 、 $P_{Gi \max}$ 分别为第 i 台发电机发出的最小、最大有功功率, $Q_{Gi \min}$ 、 $Q_{Gi \max}$ 分别为第 i 台发电机发出的最小、最大无功功率。

$$U_{i \min}^2 \leq e_i^2 + f_i^2 \leq U_{i \max}^2 \quad (19)$$

式(19)为节点电压约束, $e_i^2 + f_i^2$ 为节点 i 电压幅值平方, $U_{i \max}^2$ 、 $U_{i \min}^2$ 为节点 i 的电压最大、最小值的平方。

以式(8)为优化目标, 式(2)~式(7), 式(11)~式(19)共同构成了交直流混联供电恢复的优化模型。按照半定规划要求的标准格式, 将整体优化模型列出并逐项进行凸化。并将优化目标、约束结合电压的直角坐标形式进行整体变换, 整理为矩阵形式。

2.2 供电恢复的原始-对偶内点法求解

本文应用原始-对偶内点法来求解半定规划问题, 原对偶内点法具有良好的收敛性, 能够得到精确最优解, 更适合求解 OPF 问题。对于求极小值问题的半定规划模型, 其对偶模型为

$$\begin{cases} \max & \mathbf{b}^T \mathbf{y} \\ \text{s.t.} & \mathbf{A}^T \mathbf{y} + \mathbf{Y} = \mathbf{A}_0 \quad i = 1, \dots, n \\ & \mathbf{Y} \succeq 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{b}, \mathbf{y} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_n]$, $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ 。求解半定规划问题相当于求解原问题的对数障碍函数问题。根据原优化模型及其对偶模型, 得到整体的对数障碍函数问题模型。

$$\begin{cases} \min \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{X} - \mu \ln \det \mathbf{X} \\ \text{s.t. } \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{X} = b_i \quad i=1, \dots, m \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\mu > 0$ 为单调递减的障碍因子; $\det \mathbf{X}$ 为矩阵 \mathbf{X} 的行列式。其拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{X}, \mathbf{y}) = \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{X} - \ln \det \mathbf{X} - \sum_{i=1}^m \lambda_i (y_i - \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{X})$$

具体求解过程详见文献[14], 通过上式求解搜索方向 $(\Delta \mathbf{X}, \Delta \mathbf{Y}, \Delta \mathbf{y})$, 经过反复迭代, 直至互补对偶间隙 $\mu = \mathbf{X} \cdot \mathbf{Y} / n$ 足够小, 当 $\mu \rightarrow 0$ 时, $(\mathbf{X}(\mu), \mathbf{Y}(\mu), \mathbf{y}(\mu))$ 将精确收敛得到全局最优解 $(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*, \mathbf{y}^*)$ 。因算法对初值的选取不敏感, 为方便求解, 提高计算精度, 设置初值 \mathbf{y} 为 0 向量, 矩阵 $\mathbf{X}_0 = \mathbf{Y}_0 = \tau \times \mathbf{I}$, 其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, τ 为与最优解 $(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*, \mathbf{y}^*)$ 相同数量级的常数系数^[14]。

基于半定规划方法的交直流配电网供电恢复问题的程序求解流程主要如图 2 所示。

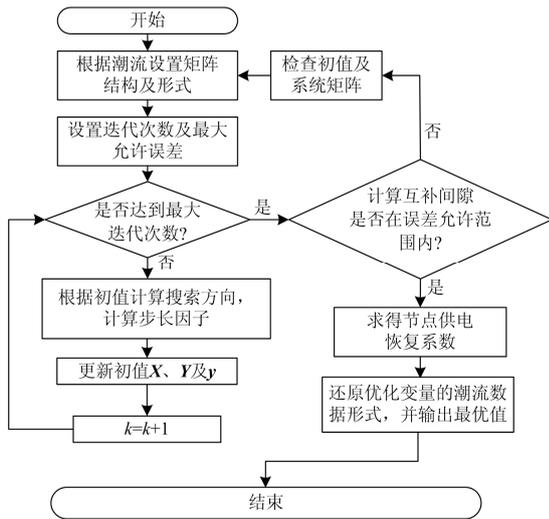


图 2 恢复流程

Fig. 2 Restoration process

当配电网发生故障时, 首先打开非故障失电区域内的分段开关, 同时将与非故障失电区域连接的联络开关或 SOP 闭合, 形成新的供电路径, 实现对非故障区域的供电恢复。当电网失电负荷过多, 供电通道容量不足以使失电区域负荷完全恢复时, 需要对非故障失电区域电压越限的节点进行切负荷处理, 否则无法满足系统中的不等式约束。本文基于电能质量, 对电压越限节点进行切负荷处理^[19]。

3 算例分析

3.1 含直流馈线的系统供电恢复

为验证上文所提出模型与求解方法的正确性和有效性, 在 Matlab 软件上开发上述程序, 并采用 sdpa-m 算法包进行求解。执行优化计算的计算机硬件环境为 Intel R Core(TM) i5-6200 CPU, 2.30 GHz 主频, 4 GB 内存, 操作系统为 Windows 10, 开发环境为 Matlab R2016a。

为实现交直流混联配电网的形成, 同时证明元件等效法的可行性, 本文在 IEEE33 节点算例上进行仿真与改造, 采用线路改造的方法, 将含有节点 26~33 的馈线改为直流线路, 节点负荷均为直流负荷, 由一侧 VSC 实现交直流的转换, 如图 3 所示。算例电压等级为 12.66 kV, 具体网络参数见文献[20], 其中有功负荷总量为 3 715 kW, 无功负荷总量为 2 300 kvar, 网络中负荷根据其供电可靠性的要求以及中断供电实际所造成影响程度可分为一级、二级和三级负荷。一级负荷为中断供电会造成人身伤亡、重大损失等的负荷; 二级负荷为中断供电会造成较大损失或影响重要用电单位正常工作的负荷; 不属于一级和二级的负荷为三级负荷^[21]。在交直流配电网中, 直流馈线中分布式电源、储能和负荷相结合, 在本文中设定为一级负荷, 交流线路中 3~18 为二级负荷, 其他为三级负荷。

设置节点 4~5 间发生三相永久性故障, 节点 5-18、26-33 所带负荷全部失电, 失电有功负荷总量为 3 255 kW。经故障隔离及 SOP 动作, 实现非故障失电区域中二级负荷交流节点 5~18、一级负荷直流节点 26~33 的供电恢复。

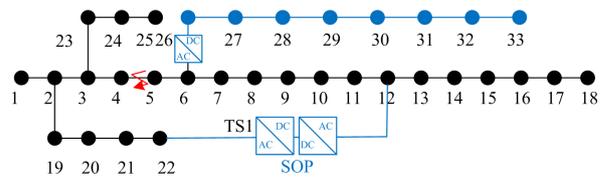


图 3 含直流馈线的改进 33 节点系统

Fig. 3 Improved 33 node with DC feeder line

应用半定规划方法对失电区域进行供电恢复, 分别设定 SOP 容量为 3~8 MVA 六种不同方案进行供电恢复。经过计算机处理后, 整体的收敛判据互补对偶间隙 μ 收敛情况见图 4, 随着 SOP 容量限制的增加, 在迭代初期时上升不高, 从而可以使得系统可以更快地收敛, 达到全局最优解。负荷恢复

情况见表 2, 为保障电能质量, 设置节点电压波动范围为 0.95~1.05, 将越限区域进行切负荷处理。各节点电压恢复情况如图 5 所示。直流线路随 SOP 容量限制, 线路节点电压变化较为明显, 恢复情况随着潮流流通呈线性函数变化。同时, 当 SOP 容量在 3~7 MVA 的情况下, 负荷无法完全恢复, 负荷恢复情况在 87%~99% 区间内, 且网损随 SOP 容量增加呈上升趋势, 需要对非故障失电区域的二级负荷进行切负荷处理, VSC 容量限制下不同等级切负荷情况如表 3。

经过表 2 恢复情况, 及图 4、图 5 对比可知, 本文所采用的元件等效方法适用于交直流的变换, 以及交直流配电网的供电恢复问题。在含直流馈线的交直流混联配电网供电恢复问题中, 直流负荷通过 SOP 恢复电能。当 VSC 容量限制为 8 MVA 时, 可以达到完全恢复。

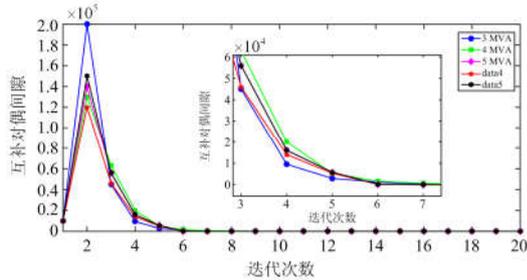


图 4 不同 SOP 容量下互补对偶间隙收敛曲线

Fig. 4 Average complementarity convergence curves with different SOP capacity

表 2 不同 SOP 容量下负荷恢复表

Table 2 Load recovery table with different SOP capacity

SOP 容量/MVA	负荷恢复情况/%	网损/MW	用时/s
3	87.52	0.216	0.059 293
4	87.55	0.218	0.058 572
5	92.87	0.223	0.058 395
6	97.67	0.225	0.057 624
7	98.87	0.231	0.058 291
8	100	0.230	0.057 256

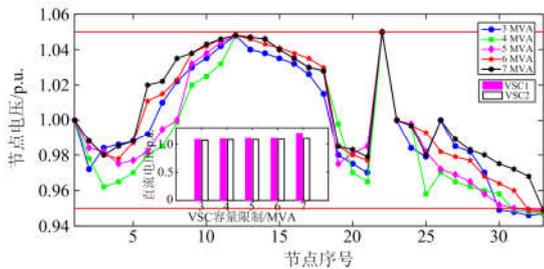


图 5 不同 SOP 容量下节点电压图

Fig. 5 Node voltage with different SOP capacity

表 3 VSC 容量限制下负荷恢复率

Table 3 Load recovery rate under VSC capacity limitation

SOP 容量/ MVA	一级负荷 恢复率/%	二级负荷 恢复率/%	三级负荷 恢复率/%
3	100	55.6	100
4	100	55.70	100
5	100	74.63	100
6	100	91.71	100
7	100	95.98	100
8	100	100	100

3.2 含直流环网的系统供电恢复

辐射配网中, 在 SOP 容量限制 3~7 MVA 时, 由于未能达到全恢复, 需要进行直流线路末端切负荷处理, 由于直流负荷等级较高, 故考虑在 SOP 容量有限的情况下, 实现二级负荷的全恢复, 本节将节点 18~33 之间连接 VSC, 从而实现直流环网, 如图 6 所示。在同样故障情景下, 再次进行供电恢复优化计算, 不同容量下的恢复效率及网损如表 4 所示。

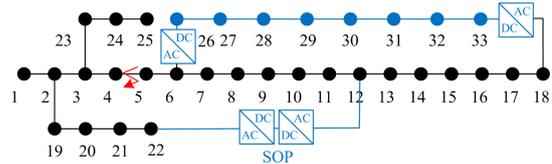


图 6 含直流环网的改进 33 节点系统

Fig. 6 Improved 33 node system with DC looped network

表 4 环网中不同 SOP 容量下负荷恢复表

Table 4 Load recovery table with different SOP capacity in looped network

SOP 容量/MVA	负荷恢复情况/%	网损/MW	用时/s
3	100	0.217	0.058 765
4	100	0.218	0.058 894
5	100	0.224	0.058 958
6	100	0.228	0.059 226
7	100	0.231	0.059 245

由表 4 可见, 在采用 VSC 形成环网, 对直流线路末端进行支援后, 直流负荷恢复情况良好, 通过 SOP 及换流器作用, 直流非故障失电区域均可实现全恢复。网损及用时均有所增加, 但仍在可接受范围内。

在交直流配网中, 考虑负荷等级, 需要根据 SOP 的容量限制, 在未能达到全恢复时需要考虑形成环网, 保证高级负荷的恢复。同时, 根据换流站的控制方式, 可以限定换流站直流侧节点电压保持在一个基准值, 可以有效减少切负荷的程度, 保证了系统的电能质量。

3.3 模型参数等效方式的精度对比

模型参数等效考虑了换流站的功率损耗，与双端发电机等效相比，精确度有所提高。本节在 IEEE 33 节点含直流馈线测试算例上，采用不同等效方案进行精确度分析。假设支路 5-6 发生三相永久性故障，经故障隔离后，6-18 节点与 26-33 节点所带负荷全部失电，失电有功负荷总量为 2 055 kW，系统如图 7。设定恢复节点电压标幺值允许波动区间为 [0.95, 1.05]，选取 SOP 的不同等效方式进行供电恢复，为保证系统负荷完全恢复，选取 SOP 容量限制为 8 MVA。选取以下两种不同的等效方式进行供电恢复。

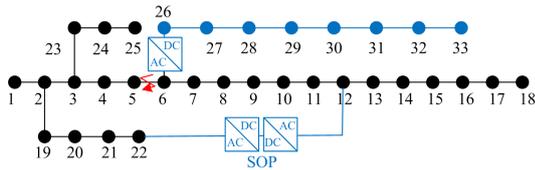


图 7 改进 33 节点算例 5~6 节点间故障

Fig. 7 Improved 33 node case fault in 5~6 node

方案 I: SOP 及 VSC 采用模型参数的等效方式，对故障后的失电区域进行供电恢复；

方案 II: SOP 及 VSC 采用双端发电机的等效方式，对故障后的失电区域进行供电恢复。

双端发电机等效是将 SOP 及直流线路两侧的 VSC 分别等效为发出负功率、正功率的发电机，如图 8 所示，损耗系数以 $P_{loss} = l_1 P_f + l_0$ 表示。在双端发电机等效模式中，根据 SOP 内部阻抗及其他损耗参数，设置损耗系数 l_1 和 l_0 分别为 0.1 和 0.02^[22-23]。直流线路采用同样等效方式，损耗系数通过线路阻抗拟合，设置 l_1 和 l_0 分别为 0.2 和 0.05。经计算得到上述两种方案的供电恢复结果，不同方案的负荷恢复结果见表 5。

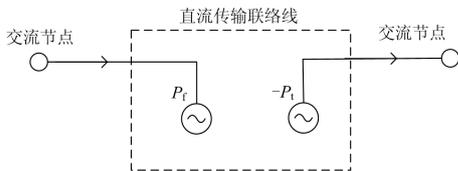


图 8 双端发电机等效方式

Fig. 8 Equivalent mode of two terminal generators

表 5 不同等效方式供电恢复对比

Table 5 Comparison of power restoration with different equivalent modes

等效方式	网损/MW	恢复时间/s
参数等效法	0.218	0.058 572
双端发电法	0.153	0.040 195

根据表 5 对比，在供电恢复问题中，SOP 通过控制故障侧电压，可以保证与其连接节点的电压值保持在稳定范围。方案 I、II 的互补对偶间隙分别为 $\mu = 6.2016021918 \times 10^{-6}$ 、 $9.6264110084 \times 10^{-7}$ ，均满足求取全局最优解的条件，迭代变化曲线见图 9。

证明了所采用的半定规划的正确性及有效性。根据图 9，在迭代至 3~4 次时，两种等效方式的互补对偶间隙差距已经开始逐渐增大，双端发电等效法间隙下降快。虽然双端发电机等效方式具有简洁易行的优势，计算时间较参数等效方法短，效率高。但由于其过于简单，无法设置 VSC 内部参数，计算精度低，在直流线路的等效过程中，因两端功率受约束限制，无法进一步计算潮流中的损耗，故方案 II 中双端发电机等效的网损偏小，不适用于交直流混合配电网的计算分析。

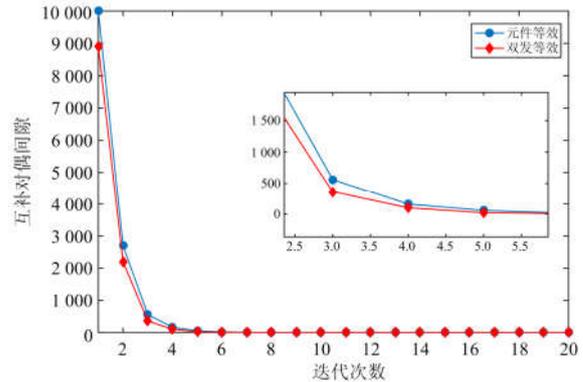


图 9 不同等效方式优化互补对偶间隙表

Fig. 9 Average complementarity convergence curves with different equivalent methods

3.4 半定规划计算效率分析

为了进一步验证基于半定规划的供电恢复方法在计算时间上的优越性，采用 3.3 节中算例，分别应用传统内点法 MIPS(Matlab Interior Point Solver, Matlab 内点法求解器)基于 3.3 节中的方案 II: 双端发电规划模型进行求解；同时采用半定规划法对元件等效模型进行求解。两种求解方式的核心算法均是基于内点法，针对大多数优化类问题，不仅能准确地求得全局最优解，而且能实现问题的快速求解。所得到的优化结果如表 6 所示。

表 6 不同算法求解效率对比

Table 6 Efficiency comparison with different algorithms

方案	网损/MW	用时/s
半定规划	0.218	0.058 572
传统内点法	0.215	1.025 64

表 6 中的时效对比明显，相比于双端发电机的简易模型的传统内点法求解供电恢复，应用半定规

划方法基于 SOP 元件等效的复杂供电恢复方法在计算速度上得到了明显的提高。根据 3.3 节不同等效方式的半定规划对比分析, 双端发电机等效法所用时间较元件等效法更短, 而应用内点法进行计算后, 半定规划法的用时几乎是内点法的 16 倍, 可见半定规划在求解交直流混联供电恢复问题中具有极强的高效性。

实际情况中, 一般采用 SOP 与传统联络开关共同作用的方法来实现供电恢复。基于上节故障情景, 考虑传统联络开关 TS4 与 SOP 共同作用时, 不同于直接 VSC 及 SOP 的交直流计算, 传统内点法供电恢复的效率会比 SOP 的恢复效率要有所降低, 故进一步应用 SOP 与传统联络开关共同实现供电恢复。在 3.3 节算例中, 设计 TS4 及 SOP 共同动作, 系统计算效果如表 7。

表 7 考虑传统联络开关效率对比

Table 7 Efficiency comparison considering the traditional connection switches

方案	网损/MW	用时/s
半定规划	0.220	0.072 511
传统内点法	0.218	3.117 32

表 7 中数据显示, 考虑共同作用的情况下, 两者所用时间均有所增加, 用时并非按线性规律变化。内点法的时长为半定规划的 43 倍, 一定程度上已经影响了供电恢复的实际效率。在 IEEE33 系统中, 内点法的所用时长尚可接受。但在大规模系统中, 内点法是理论上的全局优化方法, 其优化计算的时间将会随着系统规模的增加而呈几何增长。故对于大规模配电系统, 基于半定规划的供电恢复方法的计算效率提升将更加显著, 将更加适用于求解复杂网络的故障后供电恢复问题。

4 结论

交直流混联电网作为新型的配电网连接方式, 突出了结构简单、控制灵活的技术特点, 是未来配电网的发展方向。本文通过半定规划应用于供电恢复问题, 建立了基于模型参数等效的交直流配电网供电恢复模型, 应用稀疏技术进行快速求解, 极大地提高了求解效率。在含直流馈线的交流系统中进行优化计算, 并在 SOP 的容量限制无法实现直流负荷全恢复的情况下, 通过形成直流闭环来进行基于容量限制的全恢复, 提高了等效方式的求解精度, 与传统内点法相比, 求解效率有了大幅度提升。本文在求解时考虑仅存在 SOP 的系统, 忽略联络开关的操作, 并通过供电恢复情况对比分析进行切负荷

处理, 对模型进行了化简与省略; 如何进一步完善优化模型是未来的研究方向。随着柔性直流输电技术以及分布式电源的发展, 未来配网将逐渐发展为交直流混联系统, 区域内故障的发生将导致供电恢复方案对时效性的要求日益加强。不论从电网发展角度还是从提高配电网故障恢复效率的角度而言, 研究交直流混合配网的供电恢复问题具有重要的意义。

参考文献

- [1] 张博, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于 SOP 和 VSC 的交直流混合配电网多时间尺度优化控制[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 11-19.
ZHANG Bo, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-time scale optimal control in hybrid AC/DC distribution networks based on SOP and VSC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 11-19.
- [2] 严道, 焦彦军, 杜哲. 基于柔性直流技术的一种交直流混合配电网可行性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 110-116.
YAN Xiao, JIAO Yanjun, DU Zhe. Feasibility study of AC/DC hybrid distribution network using VSC-based DC technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 110-116.
- [3] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.
XU Huoju, MIU Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [4] LEE S, YOON Y, MOON S. VSC-HVDC model-based power system optimal power flow algorithm and analysis[C] // 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada: 1-5.
- [5] RIMEZ J, BELMANS R. A combined AC/DC optimal power flow algorithm for meshed AC and DC networks linked by VSC converters[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(10): 2024-2035.
- [6] 张昕, 张勇, 钱伟杰, 等. 基于简化零空间内点法 VSC-HVDC 离散化最优潮流的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 15-23.
ZHANG Xin, ZHANG Yong, QIAN Weijie, et al. Research on the optimal power flow of VSC-HVDC based on the simplified null space interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 15-23.
- [7] AOKI K, ICHIMORI T, KANEZASHIL M. Normal state optimal load allocation in distribution systems[J]. IEEE

- Transactions on Power Delivery, 1987, 2(1): 147-155.
- [8] MORELATO A L, MONTICALLI A J. Heuristic search approach to distribution system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 2235-2241.
- [9] 刘强, 石立宝, 倪以信, 等. 电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 8-15.
LIU Qiang, SHI Libao, NI Yixin, et al. Intelligent optimization strategy of the power grid reconfiguration during power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 8-15.
- [10] 戴志辉, 崇志强, 焦彦军. 含分布式电源的配电网多目标供电恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1959-1965.
DAI Zhihui, CHONG Zhiqiang, JIAO Yanjun. Multi-objective service restoration of distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1959-1965.
- [11] 程虹, 高元海, 王淳, 等. 基于无重访 NSGA-II 算法的配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 10-16.
CHENG Hong, GAO Yuanhai, WANG Chun, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration base on non-revisiting NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 10-16.
- [12] 吴阿琴. 考虑机组组合的水火电力系统经济调度问题——半定规划模型和算法[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
WU Aqin. Hydrothermal coordination with unit commitment-model and algorithm of semidifinite programming[D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [13] KIM S, WANG G, GEOGIOS B G. Online semi-definite programming for power system state estimation[C] // 2014 IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, May 2014, Florence, Italy, 6024-6027.
- [14] 白晓清, 韦化, FUJISAWA K, 等. 求解最优潮流问题的内点半定规划法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 56-64.
BAI Xiaoqing, WEI Hua, FUJISAWA K, et al. Solution of optimal power flow problems by semi-definite programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 56-64.
- [15] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [16] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于 SNOB 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82-87.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOB-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-87.
- [17] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOCP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
- [18] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [19] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192, 209.
WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192, 209.
- [20] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 109-114.
WEN Sheng, GU Jie, CHENG Haozhong, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.
- [21] 孙洁, 王增平, 王英男. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [22] CAO Wanyu, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165: 36-47.
- [23] MOSTAFA N, RACHID C, MARIO P. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2300-2310.

收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2019-01-08

作者简介:

吕东麟(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统自动化。E-mail: 523427668@qq.com

(编辑 魏小丽)