

一种计及柔性直流环节接入的配电网优化重构策略

直流配电形式是配电领域新的发展方向，具有巨大发展前景。直流环节的引入不仅便于直流分布式发电单元与直流负荷的接入，也提高了配电系统的潮流可控性。针对计及直流环节接入的交流配电网优化运行，重点研究柔性直流环节与传统配电重构的协同优化。分析了柔性直流环节的动态潮流调控特性，考虑其接入对配电网优化重构的拓扑约束等相关影响，给出了含柔性直流环节的配电网优化重构模型。针对重构中包含不同类型控制变量的特点，提出了一种基于混合编码的双层优化求解策略，并结合改进的IEEE 33节点算例验证了方法有效性。结果表明，计及柔性直流环节接入的配电网优化重构能够进一步地降低网络损耗与改善电压分布，促进配电系统的优化运行。

赵波 彭 俱 荆 平/全球能源互联网研究院
李智诚 和敬涵/北京交通大学电气工程学院

0 引言

现代化建设的日趋成熟促使着城市用电负荷不断增长，现有交流配电网面临着供电容量不足、输电走廊紧张及电能质量难以保障等问题。分布式电源规模化接入的迫切需求也对配电网可控性提出了更高的要求。随着电力电子技术在配用电系统中的广泛应用，人们开始思考采用直流配电的技术经济可行性^[1-4]。文献[5-7]研究指出直流配电形式的引入能够有效地提高供电容量和电能质量，加强配电网潮流控制能力，简化设备交直流变换环节，降低电能损耗和运行成本，协调电网与分布式电源之间的矛盾，提高总体的能源利用效率。

国家电网公司科技项目 (SGRI-BL-71-14-010)。

目前，国内外对于直流配电的研究尚处于起步阶段，近期内交流配电网仍会是主要供配电方式，但直流环节可以局部引入方式对交流配电网性能起补充改善的作用。直流环节的构建不仅便于直流分布式发电单元和直流用电负荷的接入，而且变流器的能量双向流动能力也使得直流环节对潮流可控，可用于改善配电网的潮流分布。在直流环节接入配电网的运行控制领域，国外相关机构也针对不同的应用场景展开了初步的研究。文献[8]分析了柔性直流环节在实现交流配电网环网运行、优化馈线间潮流分布中的应用；文献[9-10]研究了柔性直流环节促进分布式电源接入配电网的作用；文献[11]详细分析了柔性直流环节接入对配电网线路载荷能力的改善作用；文献[12]研究了柔性直流环节接入对配电网组网运行方式灵活性的提升问题。国内在此领域研究相对较少，文献[13]对直流配电的能量优化控制技术作了综述分析；文献[14]研究了基于柔性直流环节的配电网潮流主动调控。

配电网重构通过切换线路中分段开关和联络开关的开合状态来达到降低损耗、均衡负荷的目的，是配电系统优化运行的主要手段之一^[15-16]。然而，随着分布式发电并网渗透率的提高，传统配电网重构由于调整方式与开关操作约束/费用等因素，并不能很好地应对分布式电源出力不确定性所带来的复杂多变的潮流。柔性直流环节接入能够有效地补充配电网重构调控潮流的灵活性，但也给



赵波/高级工程师

关键词/Keywords

柔性直流环节·
配电网优化重构·
最优潮流·
双层优化算法·
主动配电网·

其拓扑调整带来了一定约束限制。

本文面向直流配电技术的发展趋势,立足于柔性直流环节的潮流可控特性,重点研究其与传统配电网重构的协同优化。分析了柔性直流环节作为潮流调控单元的动态响应特性,考虑其接入对于网络拓扑的约束影响,提出了一种计及柔性直流环节接入的配电网优化重构策略,并结合改进的IEEE 33节点算例进行了测试验证。

1 柔性直流环节的潮流可控特性

1.1 柔性直流环节的数学模型

本文侧重于柔性直流环节与传统配电网重构的协调优化,因此柔性直流环节仅考虑双端背靠背基础结构,如图1所示。

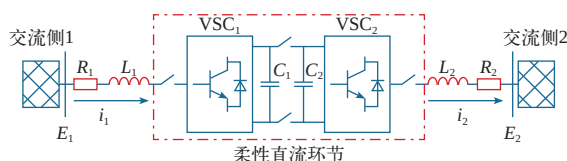


图1 柔性直流环节的结构示意图

图1中, VSC₁、VSC₂为基于全控型电力电子器件的电压源型变流器 (Voltage Source Converter, VSC); C₁、C₂为直流侧支撑电容; L₁和L₂为交流侧滤波电抗; R₁、R₂为柔性直流环节损耗的等效电阻; E₁、E₂为交流两侧的端口电压。依据图1所示拓扑,在dq同步旋转坐标系下给出基于双端背靠背结构的柔性直流环节简化数学模型^[17],即

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_1}{L_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{U_{dc}m_{d1} - E_{d1}}{L_1} \\ \frac{U_{dc}m_{q1} - E_{q1}}{L_1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_2}{L_2} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{E_{d2} - U_{dc}m_{d2}}{L_2} \\ \frac{E_{q2} - U_{dc}m_{q2}}{L_2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{m_{d1}i_{d1} + m_{q1}i_{q1}}{C_1 + C_2} - \frac{m_{d2}i_{d2} + m_{q2}i_{q2}}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

式中, $E_{d1,2}$ 、 $E_{q1,2}$ 分别为两侧交流系统的端电压d轴、q轴分量; $i_{d1,2}$ 、 $i_{q1,2}$ 分别为两侧交流电流的d轴、q轴分量; ω 为交流系统的角频率; i_{dc} 为直流侧电流; U_{dc} 为直流侧电压; $m_{d1,2}$ 、 $m_{q1,2}$ 分别为柔性直流环节变流器的开关调制函数d轴、q轴分量; $U_{dcmd1,2}$ 、 $U_{dcmq1,2}$ 分别为两侧变流器生成的交流侧端口电压d轴、q轴分量。

当所连接的两侧交流配电网处于三相对称稳定工况,忽略变流器自身功率损耗,则经柔性直流环节传输的有功功率和发出的无功功率分别为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(E_d i_d + E_q i_q) = U_{dc} i_{dc} \\ Q = \frac{3}{2}(E_q i_d - E_d i_q) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 柔性直流环节的双闭环控制策略

柔性直流环节变流器可采用经典内外双闭环控制策略,实现对其传输有功功率P、补偿无功功率Q、直流侧电压 U_{dc} 和交流侧端口电压 V_{ac} 的相应调控,结构示意如图2所示。外环依据上层具体控制目标确定其网侧电流的 i_d 、 i_q 分量参考值。内环用于控制变流器输出调制电压,通过对调制电压基波分量的准确控制,可使得实际输出电流能快速跟踪外环给定参考值,从而实现相应的控制目标。

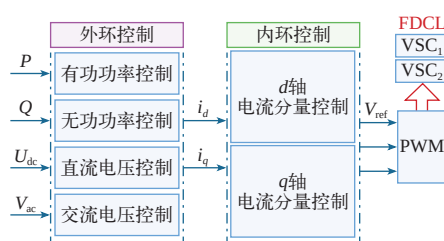


图2 柔性直流环节的双闭环控制策略示意图

柔性直流环节可根据实际需要切换两侧变流器的外环控制目标。但由式(3)、式(4)可知,只有在直流侧电压基本保持恒定时,流过柔性直流环节的有功功率才能平稳地传输。因此,两侧的控制目标需要相互协调,通常由一侧变流器维持直流电压稳定,另一侧用以调节传输的有功功率大小。

1.3 柔性直流环节功率调控仿真分析

搭建图1所示的柔性直流环节模型,分析其在双闭环控制策略下的功率调控特性。仿真参数设置为:交流配电网的额定电压为10 kV,变流器的额定容量为2 MV·A, $R_{1,2}=0.01\ \Omega$, $L_{1,2}=5\text{ mH}$, $C_{1,2}=600\ \mu\text{F}$, $U_{dc}=30\text{ kV}$ 。阶跃测试下柔性直流环节各参数的动态响应曲线如图3所示。

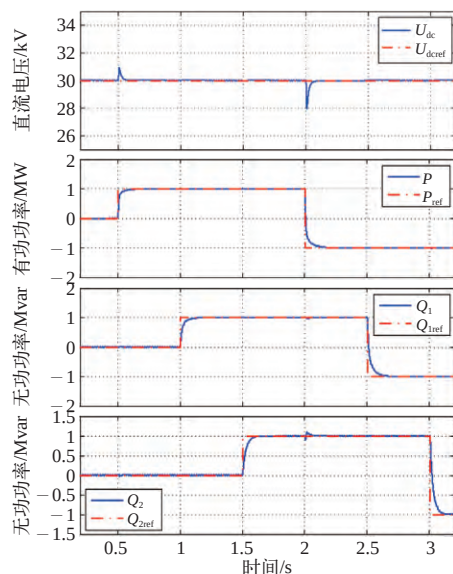


图3 柔性直流环节的功率调控响应特性

由图3可见,柔性直流环节能够快速响应潮流管理指令,实现互联配电网两侧双向传输有功功率的准确控制。并且,两侧变流器能够独立地提供无级差的容性/感性无功功率,可作为灵活的无功补偿,用以改善交流配电侧的电能质量。

2 含柔性直流环节的配电网优化重构模型

柔性直流环节接入可用以连接不同馈线或者配电区域,能够平稳连续地控制其两端的有功功率与无功功率,实现分区网络间的合环运行与潮流互济。当其与传统优化重构协同配合时,能够实现对配电网潮流柔性、灵活的调控,有助于能量流的全局优化。

以网络线路损耗最小作为配电网优化重构的目标函数,可用数学表达式描述为

$$\min f = \sum_{i=1}^N k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} + \sum_{m=1}^M \eta P_m \quad (5)$$

式中, N 为支路总数; k_i 为支路 i 上的开关状态变量,0表示断开,1表示闭合; r_i 为支路 i 的电阻; P_i 、 Q_i 分别为流过支路 i 的有功功率和无功功率; U_i 为支路 i 末端的节点电压; M 为接入柔性直流环节个数; η 为柔性直流环节的功率传输效率; P_m 为流过柔性直流环节的有功功率。

网络重构需要满足辐射状网络拓扑约束、潮流方程约束、支路容量约束及节点电压约束。计及柔性直流环节接入,则还应满足其变流器的容量约束,即

$$P_{\text{FDCL}}^2 + Q_{\text{FDCL}}^2 \leq S_{\text{FDCL}}^2 \quad (6)$$

式中, P_{FDCL} 为经柔性直流环节传输的有功功率; Q_{FDCL} 为其两侧变流器所提供的无功功率大值; S_{FDCL} 为其变流器的额定容量。

寻优算法中适应度值是指导优化搜索前进方向的依据,如式(7)所示。

$$F = C - g(x) - p(x) \quad (7)$$

式中, C 为常数,用以将最小值寻优转化为最大值寻优问题; $g(x)$ 为式(5)所示的目标函数; $p(x)$ 为违反相关约束条件的惩罚函数,用以减小不良个体进入下次迭代概率,其表达式为

$$p(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i (I_i - I_{i\text{lim}})^2 + \sum_{k=1}^L \beta_k (V_k - V_{k\text{lim}})^2 + \sum_{j=1}^M \gamma_j (S_j - S_{j\text{lim}}) \quad (8)$$

式中,三项表达式分别对应违反线路容量约束、违反节点电压约束和违反柔性直流环节变流器容量约束的惩罚函数; α_i 、 β_k 和 γ_j 分别为各项的权重系数; $I_{i\text{lim}}$ 为支路电流限值; $V_{k\text{lim}}$ 为节点电压限值; $S_{j\text{lim}}$ 为变流器容量限值。

3 计及柔性直流环节接入的配电网重构策略

3.1 基于混合编码的分层优化求解策略

线路开合状态适合采用0/1二进制编码方式,而柔性直流环节的控制参数属于浮点数,采用二进制编码会使得权值表示准确度存在一定误差。针对计及柔性直流环节接入的配电网重构,采用

混合编码的表示方式。

基于二进制编码的遗传寻优算法被广泛应用于配电网重构中,具有鲁棒性强、全局搜索能力好等特性,但传统的交叉、变异算子并不适用于实数编码的变量更新^[18]。相较于遗传算法,粒子群寻优算法则更适于处理实数编码,具有结构简单、运算速度快等优势。据此,提出基于混合编码的分层优化求解策略,流程如图4所示。

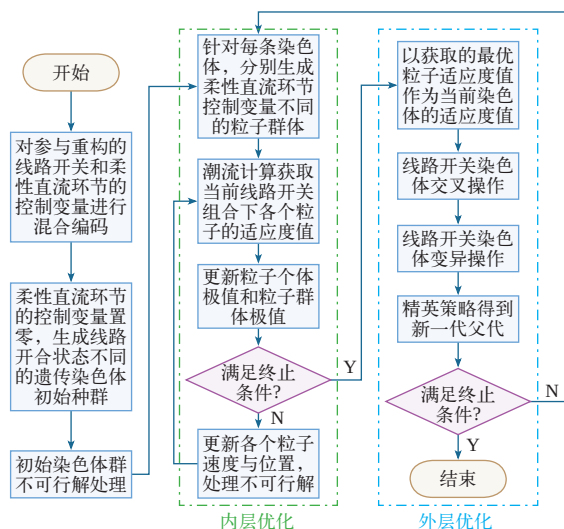


图4 配电网优化重构分层求解策略流程

外层优化依据预先设置的最大重构次数、最大开关动作次数等限制条件,对传统的分段开关或联络开关进行操作,用以生成不同的线路开合状态组合。由于柔性直流环节所连接的交流网络要求有源,即其两侧至电源节点路径上的开关都应闭合状态,且还应满足辐射状网络拓扑约束,因此外层优化需要对所生成的开关状态组合进行拓扑校验,并对其中的不可行解进行修正或删除。

内层优化依次获取所给定的网络拓扑结构,应用自适应粒子群算法在确定的线路开合状态下对柔性直流环节的控制参数进行寻优求解。首先,根据柔性直流环节的功率容量与功率因数限制,生成由 n 个粒子组成的种群 P ,其中每个粒子 P_i 即代表柔性直流环节的一个状态,为一个 D 维向量,其维度由柔性直流环节的个数及可控参数变量决定,即

$$P = (P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n) \quad (9)$$

$$P_i = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_D)^T \quad (10)$$

参照上述目标函数与惩罚函数的设置,通过潮流计算逐一获取粒子的适应度值。经由多次迭代寻优则可获取最优粒子适应度值,即在当前拓扑下通过柔性直流环节功率调控所能获取的满足相关约束的最小网损值。此时内层寻优结束,返回所求取最小网损作为外层当前染色体的适应度值。

外层通过循环调用内层优化以获取遗传染色体种群的适应度值,进而通过交叉、变异操作及基于精英策略的选择操作来实现种群更新,经若干代数进化则可求得全局最优目标函数值。

3.2 分层优化策略求解配电网重构的具体实现

(1) 双层混合编码方式

参与重构线路的开合状态和柔性直流环节的使能状态采用二进制编码。柔性直流环节的控制变量采用实数编码,具体包括所传输的有功功率(P_m)及其两侧变流器所补偿的无功功率(Q_{m1} , Q_{m2}),其中 m 表示柔性直流环节编号。编码结构示意图如图5所示。

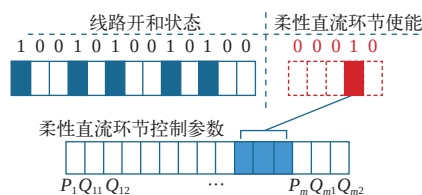


图5 双层混合编码结构示意图

(2) 寻优操作参数设置

寻优操作参数包括外层优化的遗传交叉率 p_c 和遗传变异率 p_m 以及内层优化的粒子群惯性权重 w 。合理设置参数能够在保证算法收敛性的同时改善寻优速度,可在一定程度上降低寻优算法的计算量。具体设置如式(10)~式(12)所示,可依据迭代寻优进程自适应地进行动态调整,能够使算法在迭代初期具有较强的全局搜索能力,在迭代后期可实现更准确的局部搜索。

$$p_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

$$w(k) = \begin{cases} w_{\text{start}} - \left(\frac{k}{G_{\max}}\right)^2 \cdot (w_{\text{start}} - w_{\text{end}}) & f \geq f_{\text{avg}} \\ w_{\text{start}} = w_{\text{end}} & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, f 为外层寻优的当前操作染色体适应度值; f_{avg} 为染色体群的平均适应度值; $f_{\max}$ 为染色体群当前最优适应度值; k_1 、 k_2 为交叉率参数, 取值区间为 $[0.5, 1]$; k_3 、 k_4 为变异率参数, 取值区间为 $[0, 0.2]$; $G_{\max}$ 为内层寻优的最大迭代次数; k 为内层当前迭代次数; w_{start} 、 w_{end} 分别为寻优初始时和终止时的粒子惯性权重。

内层寻优粒子惯性权重 w 的设置依据: 考虑变流器设备成本与运行维护费用等因素, 可假定配电网中柔性直流环节数量较少, 且其功率容量也较为受限, 所以在分层寻优过程中线路开关状态对目标函数的影响要大于柔性直流环节调控的影响。迭代初期染色体群的线路开关组合呈多样化, 故内层寻优仅采用恒定的惯性权重来获取当前线路开关组合所能达到的较优解, 能够改善寻优收敛速度。迭代后期由于精英保留策略使得种群个体具有较高的一致性, 故内层优化采用动态惯性权重来加强算法的局部搜索能力, 从而保证目标函数最优解的获得。

(3) 不可行解的纠正

配电网辐射状拓扑连通的约束和柔性直流环节所连接两侧系统需为有源网络的要求, 使得解空间中存在不可行解。对于寻优过程中不可行解的处理, 剔除和替换的方法都会在一定程度上导致不可行解中包含的有益模式丢失, 从而干扰进化进程。本文采用纠正策略对不可行解进行处理^[19], 即以图论为基础, 通过深度优先搜索获取不可行解中的回路/“孤岛”, 进而断开/闭合相应的线路开关。

(4) 收敛条件

种群优化搜索的收敛条件设置为连续若干代群体最优适应度值的波动范围小于给定误差, 以

及当前进化代数已达到最大进化代数。

4 算例分析

选以图6所示改进的IEEE 33节点测试系统^[20]验证基于混合编码的分层寻优策略。考虑变流器设备体积限制等因素, 假定柔性直流环节替换装设于原始拓扑的联络开关位置, 可选择如图6所示的FDCL33~FDCL37处。先以柔性直流环节接入FDCL37位置为例给出具体的优化重构运算结果。

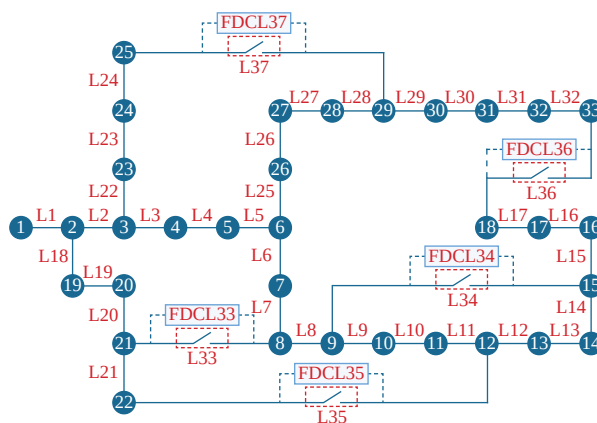


图6 含柔性直流环节的IEEE 33节点系统

算例仿真具体参数设置为: 外层寻优染色体种群数量设置为20个, 最大进化代数为100次, 连续10代最优适应度值波动范围小于给定误差则结束寻优; 内层粒子种群数量设置为20个, 最大进化代数为50次; 柔性直流环节容量大小为500 kV·A, 能量传输效率设为97%; 线路电流承载能力设置为400 A; 适应度函数中 C 设为2。

在潮流优化调控过程中考虑电压幅值变化对负荷功率大小的影响, 负荷功率—电压依赖性采用如下模型, 即

$$P_{\text{Load}} = P_0 \left\{ a_p + b_p \frac{v}{v_0} + (1 - a_p - b_p) \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

$$Q_{\text{Load}} = Q_0 \left\{ a_Q + b_Q \frac{v}{v_0} + (1 - a_Q - b_Q) \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

式中, P_0 、 Q_0 为对应原始电压 v_0 的负荷功率; P_{Load} 、 Q_{Load} 为对应实际电压 v 的负荷功率; (a_p , a_Q) 为功率型负荷系数; (b_p , b_Q) 为电流型负荷系数; ($1 - a_p - b_p$, $1 - a_Q - b_Q$) 为阻抗型负荷系

数; 设 a_P 和 a_Q 的值为0.7, b_P 和 b_Q 的值为0.2。

联络开关37替换为柔性直流环节的配电网重构结果如表1和图7、图8所示。

表1 联络开关37换为柔性直流环节的重构结果

比较项目	原始网络	一般重构	本文重构
网络损耗值/MW	0.202 5	0.139 5	0.108 1
最大电压偏差(%)	8.7	6.2	5.25
断开开关编号	33, 34, 35, 36, 37	7, 9, 14, 32, 37	7, 9, 14, 32
柔性直流环节	节点25流向节点29: 0.020 MW		
37的功率设定	两侧无功: 0.488 Mvar, 0.498 Mvar		

图7给出了算法适应度函数值在迭代过程中的变化曲线。图8为原始网络、一般重构和本文重构的电压分布比较示意图。

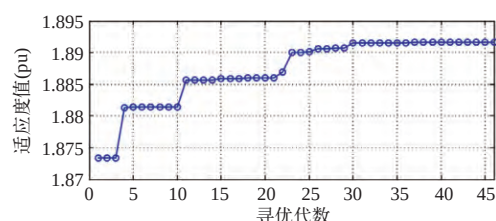


图7 寻优过程最优适应度值曲线

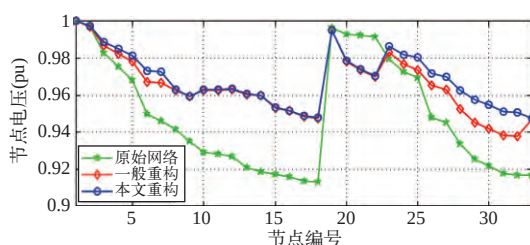


图8 不同拓扑结构的电压分布比较示意图

图7中, 寻优过程在第36次迭代获取最优适应度值, 继续10次迭代搜索未获取更优解则结束寻优。结合表1所示仿真结果, 相较一般优化重构, 柔性直流环节的接入能够进一步地降低线路损耗与改善最大节点电压偏差。需要注意的是, FDCL37接入主要起无功补偿作用, 其相应有功潮流调控作用较小。图8中, FDCL37的调控明显提升了其所连两侧节点(23~32)的电压幅值。这是由于本文设定网络有功损耗作为目标函数, 而拟定柔性直流环节的有功传输效率较低, 因而在寻优过程中经过柔性直流环节的有功潮流会受到一定限制。

上述柔性直流环节接入FDCL37处代表连接一条馈线末端与另一馈线中部的优化结果。给出柔性直流环节连接两条馈线末端(FDCL36)以及柔性直流环节连接一条馈线首末两端(FDCL34)的优化结果, 如表2所示。

表2 单台柔性直流环节替换不同联络开关的重构结果

所替换联络开关	FDCL 34	FDCL 36
网络损耗值/MW	0.124 4	0.110 0
最大电压偏差(%)	5.19	4.4
断开开关编号	9, 31, 33, 37	7, 9, 14, 17
柔性直流环节功率设定 /MW, Mvar, Mvar	0.107, 0.488, 0.485	0.002, 0.497, 0.394

表2中, 柔性直流环节接入FDCL34或FDCL36时, 配电系统的线路损耗与电压偏差也都得到了不同程度的改善, 尤其是其接入馈线末端时网络最大节点电压偏差得到了良好的改善。同时也可注意到, 柔性直流环节接入FDCL34时进行了适当的有功调控用以均衡两侧馈线的有功负载。

5 结束语

柔性直流环节连续可调、可频繁动作的特点, 作为传统网络重构手段的补充, 能够很好地提高配电系统的潮流调控能力。在分析柔性直流环节的潮流可控特性基础上, 提出了一种基于混合编码的分层优化重构求解策略, 算例验证表明该方法能够有效求解计及柔性直流环节接入的配电网重构问题。由仿真结果可知, 计及柔性直流环节接入的配电网优化重构可以实现潮流灵活调控, 可更好地降低网络损耗与改善电压分布, 有助于促进配电网的经济优化运行。

参考文献

- [1] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (8): 98-104.
- [2] 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, 5.
- [3] 张祖平. 直流配电技术的发展前景 [J]. 供用电, 2014 (7): 16-19.

- (收稿日期: 2015-04-15) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告