

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.04.002

交直流配电网的交换功率灵活性提升方法研究

程亮¹, 黄河¹, 朱磊¹, 孙琦润², 吴志², 韩俊³

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

摘要:分布式电源(DG)的大规模接入增加了配电网运行的不确定性,主动配电网要求网络具有较强的可观可控性,交直流混合配电网运行方式更加灵活可靠,是未来配电网的发展趋势。文中考虑主动配电网的网络重构、DG无功补偿等措施,建立基于二阶锥规划的交直流配电网与主网交换功率评估模型,求解配电网与主网的交换功率灵活性范围,该范围可为配电网和主网的运行调度提供技术参考。94节点算例验证了模型的有效性,结果表明交直流混合配电网相比传统交流配电网,与主网的交换功率灵活性范围更大,同时电压源换流器容量、DG出力水平等因素与该灵活性范围相关。

关键词:交直流混合配电网;交换功率;二阶锥规划;灵活性范围

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)04-0010-08

0 引言

近年来,为了解决能源和环境危机,基于新能源发电的分布式电源(distributed generation, DG)在配电网中的接入量不断提升。新能源出力的随机性、间歇性特征给配电网的正常运行带来了一定的影响^[1-4],为了解决该问题,传统配电网正逐步向主动配电网过渡^[5-8]。配电网维持供需平衡状态是保证系统运行可靠性的基本要求。DG大规模接入后,一方面作为后备电源,可以减小网络传输功率,另一方面其随机性和不确定性较高,对供需平衡机制产生了较大影响^[9]。因此,有必要从灵活性角度出发,求出不同运行状态下配电网与主网间的交换功率灵活性范围,为配网与主网的运行调度提供参考。

当前研究主要从经济性和可靠性方面考虑,部分文献通过网络重构^[10-13]、储能的灵活调度^[14]、DG的优化运行^[15]等措施,降低从主网购电的成本,提高供电可靠性。文献[16]分析了考虑系统运行安全时输电网和配电网之间可行的传输功率。总体上,从灵活性的角度考虑该问题的研究较少,而DG的接入使得配电网侧的功率需求处于波动状态,考虑到主网侧的传输功率波动和线路阻塞问题,变电站的供电功率可能与需求功率不匹配^[17]。

直流配电网的供电容量大、可控性强、供电可靠性高,性能比交流配电网更加优越,有利于DG的

接入^[18]。当前在直流配电网的拓扑结构、电压等级、规划设计、优化运行等方面取得了一定的研究进展^[19]。在交流配电网基础上建设交直流混合配电网是未来发展的方向^[20],交直流混合配电网运行方式更加灵活多变,可以提高配电网供电的灵活性。

文中考虑网络重构、DG无功补偿等措施,建立交直流混合配电网与主网交换功率评估模型。采用二阶锥松弛技术将非凸非线性的约束条件进行松弛,将模型转化为混合整数二阶锥规划模型求解,求解交直流混合配电网与主网交换功率的灵活性范围,比较其相对传统交流配电网的提升,并分析网络重构、DG出力水平等因素对该范围的影响。最后采用94节点算例进行测试,验证模型的有效性。

1 交直流混合配电网与主网交换功率

1.1 交换功率灵活性

配电网的功能是从主网侧接受电能,并通过配电设施将电能分配给各用户。配电网与主网交换功率灵活性是指配电网与主网间的交换功率(特指有功功率)有灵活性的调节范围,如图1所示。配电网中通常包含多所变电站,当某变电站产生功率缺额,不能实现供需平衡时,可以通过网络重构等措施,实现不同变电站之间的负荷转供,因此不同变电站与主网的交换功率均有一定的可行范围。

1.2 交直流混合配电网

典型的交直流混合配电网结构如图2所示,交流配电网和直流配电网间通过电压源换流器

收稿日期:2019-01-25;修回日期:2019-04-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707033)

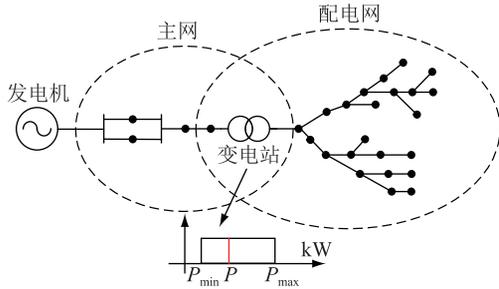


图1 交换功率灵活性

Fig.1 Flexibility of exchange power

(voltage source converter, VSC)连接。交流配电网为保证其安全可靠运行,需要保持辐射状运行,而直流配电网的潮流易于控制,运行更加灵活可靠。交流配电网之间通过直流配电网连接可使整个网络处于环网运行状态,因而交直流混合配电网在运行方式上可呈现出更多的灵活性。

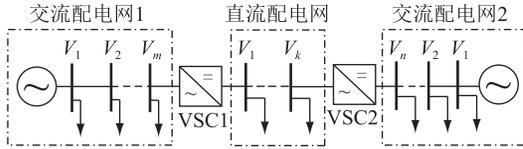


图2 交直流混合配电网结构

Fig.2 Structure of a hybrid AC/DC distribution network

交直流混合配电网中,交流配电网内部传输功率,包括有功和无功功率,对交流负荷进行供应;直流配电网内部传输有功功率,对直流负荷进行供应,通过VSC控制,可在交流配电网与直流配电网间实现灵活的功率流动,有利于DG富余电量的外送,可促进高比例DG的消纳。交直流混合配电网中包含的3种线路如图3所示。

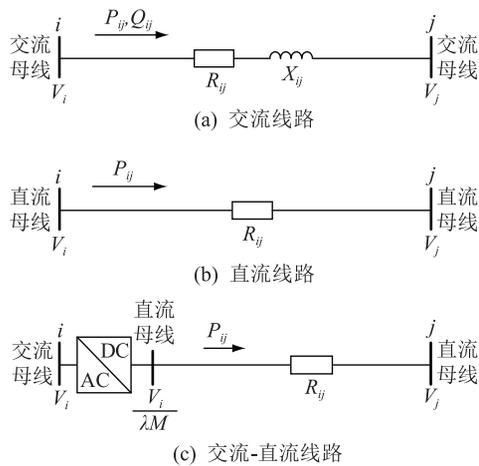


图3 3种线路结构

Fig.3 Three circuit structures

对VSC交直流两侧的电压、功率转换关系进行建模,如式(1)、式(2)所示(考虑功率从交流侧流向直流侧)。

$$U_{ac} = \lambda K U_{dc} \quad (1)$$

$$P_{dc} = P_{ac} \eta \quad (2)$$

式中: λ 为VSC的电压调制系数; K 为VSC的电压调制比; η 为VSC的功率转化效率。

2 交换功率评估模型

2.1 目标函数

为求出交直流混合配电网与主网间的交换功率灵活范围,应求解配电网与主网间可行交换功率的最大值和最小值,如式(3)、式(4)所示。

$$\max \sum_{i \in N_{sub,n}} P_{sub,i} - \Phi_1 \sum_{ij \in L} I_{ij}^2 r_{ij} \quad (3)$$

$$\min \sum_{i \in N_{sub,n}} P_{sub,i} + \Phi_2 \sum_{ij \in L} I_{ij}^2 r_{ij} \quad (4)$$

式中: $N_{sub,n}$ 为第 n 所变电站节点的集合; L 为所有线路的集合; $P_{sub,i}$ 为变电站注入节点 i 的有功功率; r_{ij} , I_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和流过的电流; Φ_1 , Φ_2 为权重系数。考虑实际运行中网络损耗不应过大,其作为另一个目标函数,同时网损与支路电流相关, Φ_1 , Φ_2 的取值决定了二阶锥松弛的精确性^[21]。

2.2 交直流混合配电网运行约束

2.2.1 辐射状约束

交流配电网一般设计为闭环结构,采用开环运行方式(即辐射状运行),该运行方式可提高供电的可靠性。辐射状运行需满足如下约束:

(1) 运行线路的数量等于系统节点的数量减去变电站节点的数量。

(2) 每个负荷节点必须与某变电站相连通,不能形成孤岛,因此引入虚拟功率约束^[22]。

$$\sum_{ij \in L_{ac}} y_{ij} = N_{L_{ac}} - N_{sub} \quad (5)$$

$$0 \leq \tilde{P}_{sub,i} \leq N_{ac} \quad \forall i \in N^{sub} \quad (6)$$

$$\tilde{P}_{L,i} = \begin{cases} 0 & \forall i \in N^{sub} \\ 1 & \forall i \in N^{ac}/N^{sub} \end{cases} \quad (7)$$

$$-N_{ac} y_{ij} \leq \tilde{P}_{ij} \leq N_{ac} y_{ij} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in f(i)} \tilde{P}_{ji} - \sum_{k \in b(i)} \tilde{P}_{ik} = \tilde{P}_{L,i} - \tilde{P}_{sub,i} \quad (9)$$

式中: $N_{L_{ac}}$, N_{sub} , N_{ac} 分别为交流线路、变电站节点、交流节点的数量; N^{ac} , N^{sub} , N^{ac}/N^{sub} 分别为交流节点、变电站节点、交流负荷节点的集合; $f(i)$ 为以节点 i 为末端的线路的首端节点的集合; $b(i)$ 为以节点 i 为首端的线路的末端节点的集合。 $\tilde{P}_{sub,i}$, $\tilde{P}_{L,i}$, \tilde{P}_{ij} 分别为变电站节点 i , 负荷节点 i , 线路 ij 的虚拟功率; y_{ij} 为线路 ij 的状态,为0-1变量(运行时为1,断开时为0)。

2.2.2 辐射状配电网的 Disflow 支路潮流约束

(1) 交流配电网。潮流约束条件^[23]包括节点流入与流出的功率保持平衡、满足线路首末端节点的压降关系、满足线路流过的功率与节点电压和电流的关系。

$$\begin{cases} \sum_{k \in f(i)} P_{ik} - \sum_{j \in b(i)} (P_{ji} - I_{ji}^2 r_{ji}) = P_{in,i} \\ \sum_{k \in f(i)} Q_{ik} - \sum_{j \in b(i)} (Q_{ji} - I_{ji}^2 x_{ji}) = Q_{in,i} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{in,i} = P_{dg,i} + P_{sub,i} - P_{L,i} \\ Q_{in,i} = Q_{dg,i} + Q_{sub,i} - Q_{L,i} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{ik} , Q_{ik} 为线路 ik 从节点 i 流向 k 的有功、无功功率; $P_{in,i}$, $Q_{in,i}$ 为节点 i 的注入有功、无功功率; $P_{dg,i}$, $P_{sub,i}$ ($Q_{dg,i}$, $Q_{sub,i}$) 为 DG、变压器注入节点 i 的有功(无功)功率; $P_{L,i}$, $Q_{L,i}$ 为节点 i 处负荷的有功、无功功率; r_{ji} , x_{ji} 分别为线路 ji 的电阻、电抗参数。

$$V_i^2 - V_j^2 = 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) - I_{ij}^2(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (12)$$

$$V_i^2 I_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (13)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压大小。式中包含变量平方项,用 \hat{V} , \hat{I} 分别表示电压、电流的平方,将约束条件线性化。考虑网络重构时,线路的运行状态不确定,式(12)不能表示处于断开状态线路的压降关系,需要对该约束条件进行修改。具体方法为引入中间变量 $\Delta\hat{V}_{ij}$,采用大 M 法进行约束。

$$\Delta\hat{V}_{ij} = V_i^2 - V_j^2 - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) + I_{ij}^2(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (14)$$

$$-M(1 - y_{ij}) \leq \Delta\hat{V}_{ij} \leq M(1 - y_{ij}) \quad (15)$$

式中: M 为一个很大的正整数,若线路 ij 断开,则 $y_{ij} = 0$, $\Delta\hat{V}_{ij}$ 的取值范围为 $[-M, M]$,即线路压降不受式(12)的约束。因此,式(14)、式(15)可表示所有交流线路的压降关系。

(2) 直流配电网。直流配电网中传输的功率为有功功率,其潮流约束条件如下:

$$\begin{cases} \sum_{k \in f(i)} P_{ik} - \sum_{j \in b(i)} (P_{ji} - \hat{I}_{ji}^2 r_{ji}) = P_{in,i} \\ P_{in,i} = P_{dg,i} + P_{sub,i} - P_{L,i} \end{cases} \quad (16)$$

$$\hat{V}_i - \hat{V}_j = 2P_{ij}r_{ij} - I_{ij}^2 r_{ij}^2 \quad (17)$$

$$\hat{V}_i \hat{I}_{ij} = P_{ij}^2 \quad (18)$$

对于交流-直流线路,将交流节点等效为直流节点,将其等效为直流线路,运用直流潮流约束进行处理。

2.2.3 线路电压电流二阶锥约束

约束条件式(13)中包含变量的乘积项、二次

项,可行域为二阶锥的表面,模型非凸、非线性。将变量线性化,同时对约束做松弛,如式(19)所示。

$$\hat{V}_j \hat{I}_{ij} \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (19)$$

模型的可行域变为二阶锥体(凸可行域),可使用商业求解器如 CPLEX 进行求解。式(19)的二阶锥形式如下所示。对于直流线路,将式(20)中的 Q_{ij} 取 0 即可。

$$\hat{I}_{ij} + \hat{V}_i \geq \left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \hat{I}_{ij} - \hat{V}_i \end{array} \right\|_2 \quad (20)$$

考虑网络重构时,式(20)对断开状态线路不适用,需要引入中间变量 $\zeta_{ij,+}$ 和 $\zeta_{ij,-}$ 代替 $\hat{I}_{ij} + \hat{V}_i$ 和 $\hat{I}_{ij} - \hat{V}_i$,并采用大 M 法对其取值范围进行约束。

$$\hat{I}_{ij} + \hat{V}_i - M(1 - y_{ij}) \leq \zeta_{ij,+} \leq \hat{I}_{ij} + \hat{V}_i + M(1 - y_{ij}) \quad (21)$$

$$\hat{I}_{ij} - \hat{V}_i - M(1 - y_{ij}) \leq \zeta_{ij,-} \leq \hat{I}_{ij} - \hat{V}_i + M(1 - y_{ij}) \quad (22)$$

若线路 ij 断开,则 $y_{ij} = 0$, $\zeta_{ij,+}$ 和 $\zeta_{ij,-}$ 的取值范围为 $[-M, M]$,取值任意,式(20)可表示为如下形式,表示所有交流线路的二阶锥约束。

$$\zeta_{ij,+} \geq \left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \zeta_{ij,-} \end{array} \right\|_2 \quad (23)$$

2.2.4 VSC 约束

VSC 是交直流混合配电网中的关键器件,通过的功率关系可表述为 $P_{vsc}^2 + Q_{vsc}^2 = S_{vsc}^2$,松弛为二阶锥形式如式(24)所示,转换功率受容量的限制,如式(25)所示。VSC 有无功调节能力,但需保持其功率因素不低于最小值,如式(26)所示。

$$\left\| \begin{array}{c} P_{vsc,i} \\ Q_{vsc,i} \end{array} \right\| \leq S_{vsc,i} \quad (24)$$

$$S_{vsc,i} \leq \bar{S}_{vsc} \quad (25)$$

$$-P_{vsc,i} \tan(\cos^{-1} \underline{F}_{vsc}) \leq Q_{vsc,i} \leq P_{vsc,i} \tan(\cos^{-1} \underline{F}_{vsc}) \quad (26)$$

式中: $P_{vsc,i}$, $Q_{vsc,i}$, $S_{vsc,i}$ 分别为节点 i 处 VSC 流过的有功、无功和视在功率; \bar{S}_{vsc} 为 VSC 容量; \underline{F}_{vsc} 为 VSC 功率因素的最小值。

2.2.5 DG 约束

文中考虑 DG 具有无功调节的能力,但须保持其功率因素不小于最小值,如式(27)所示。接入功率受新能源出力水平的限制,如式(28)所示。

$$-P_{dg,i} \tan(\cos^{-1} F_{dg}) \leq Q_{dg,i} \leq P_{dg,i} \tan(\cos^{-1} F_{dg}) \quad (27)$$

$$P_{dg,i} \leq \bar{P}_{dg} \alpha_i \quad (28)$$

式中: $P_{dg,i}$, $Q_{dg,i}$ 分别为 DG 接入节点 i 的有功、无功功率; \bar{P}_{dg} 为 DG 的最大输出功率; F_{dg} 为 DG 最小功率因素; α_i 为节点 i 的 DG 出力水平。

2.2.6 上下限约束

上下限约束是指配电网中电气设备的运行参数不能超过其安全界限值。

$$\underline{V}_i^2 \leq \hat{V}_i \leq \bar{V}_i^2 \quad (29)$$

$$0 \leq \hat{I}_{ij} \leq \bar{I}_{ij}^2 \quad (30)$$

式中: \underline{V}_i , \bar{V}_i 分别为节点 i 电压的最小值和最大值; \bar{I}_{ij} 为线路 ij 允许通过的最大的电流。

3 算例分析

算例如图 4 所示,包含 2 座变电站,变电站 1 包含主变压器 T_1 和 T_2 ,变电站 2 包含主变压器 T_3 和 T_4 ,包含 94 个节点,83 条支路与 11 条联络线,支路参数与节点峰值负荷见文献[24],有分段开关的线路为 5—6、11—12、19—20、26—27、33—34、37—38、38—39、51—52、68—69、74—75、78—79。交流电压等级为 11.4 kV,电流最大值取 500 A。

将部分联络线调整为直流线路后的交直流混合配电网如图 5 所示,直流电压等级为 18.6 kV,电流最大值取 300 A。

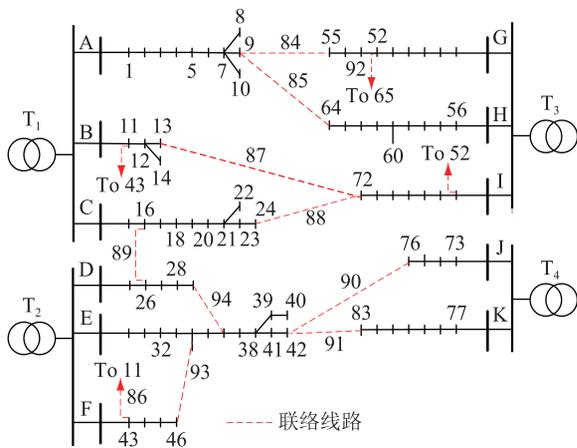


图 4 94 节点算例系统

Fig.4 94-node test system

3.1 模型有效性验证

文中模型采用二阶锥松弛将线路功率约束松弛为式(19)的形式,若模型精确成立,其应满足等式条件^[21,25],定义二阶锥误差(系统电流偏差量的最大值)如式(31)所示,若 ε 接近于 0,则等式条件

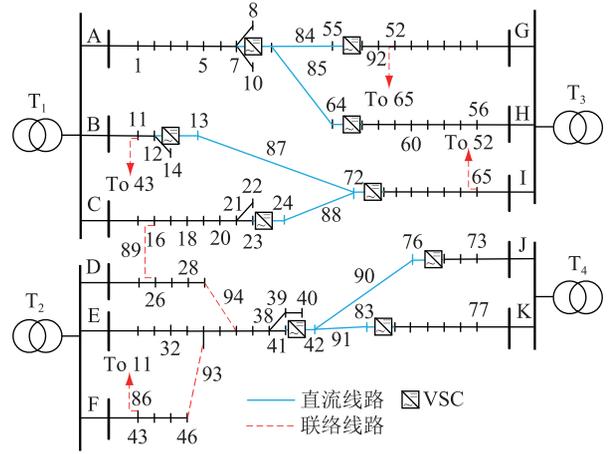


图 5 交直流混合配电网

Fig.5 AC/DC hybrid distribution network

成立,二阶锥松弛精确成立。

$$\varepsilon = \left\| \sqrt{\hat{I}_{ij}} - \sqrt{\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{\hat{V}_i}} \right\|_{\infty} \quad (31)$$

对算例进行求解,验证模型的有效性。在 ϕ_1 大于等于 10 之后, ε 的数量级为 10^{-4} , ε 与系统平均电流相比(100 A 左右)可忽略不计,二阶锥松弛精确成立,下文取 $\phi_1 = 10$ 进行求解;同理,在 ϕ_2 大于等于 0.1 之后, ε 的数量级为 10^{-2} ,误差极小,下文取 $\phi_2 = 0.1$ 进行求解。

3.2 交流配电网的交换功率灵活性范围

变电站 1 所供负荷的有功功率为 16 430 kW,变电站 2 所供的有功负荷为 11 920 kW。不考虑 DG 的接入,仅考虑网络重构,变电站 1、变电站 2 与主网交换功率的灵活性范围如表 1 所示。

表 1 交换功率灵活性范围

Table 1 Flexibility range of exchange power

名称	P_{\min}/kW	P_{\max}/kW
变电站 1	14 469	16 693
变电站 2	12 015	14 398

变电站 2 对变电站 1 转供的负荷最大时,变电站 1 与主网的交换功率为 P_{\min} ;变电站 1 对变电站 2 转供的负荷最大时,变电站 1 与主网的交换功率为 P_{\max} ,反映了变电站 1 与主网交换功率的灵活性范围。

对于变电站 1, P_{\min} 相对负荷值较低, P_{\min} 对应的网络重构情况如图 6 所示。图中,通过网络重构,变电站 2 对变电站 1 内节点 20—24、34—42 的负荷进行了转供,因此变电站 1 的 P_{\min} 相比负荷值较低,而变电站 2 的 P_{\min} 与其负荷值较接近,说明变电站 1 对变电站 2 的转供能力很小。

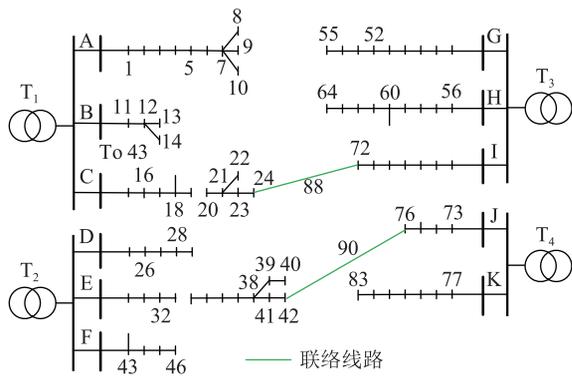


图6 网络重构情况

Fig.6 Network reconfiguration

在节点 6、7、12、20、21、75、79、80 中接入 DG,取 DG 装机容量为 1 000 kW·A,最小功率因素为 0.85。考虑新能源出力不同时,变电站 1 与主网交换功率灵活性范围如表 2 所示。

表 2 变电站 1 交换功率灵活性范围

Table 2 Flexibility range of exchange power for substation 1

名称	P_{\min}/kW	P_{\max}/kW
未接入 DG	14 469	16 693
DG 20%	13 836	17 023
DG 50%	11 296	17 495
DG 70%	10 686	18 013
DG 100%	7 102	17 423

变电站 1 包含 4 个 DG 装机节点,由表 2 可知, DG 接入后, P_{\max} 增大, P_{\min} 减小, 交换功率的灵活性范围增大。随着 DG 接入容量的增大, P_{\min} 值逐渐减小, P_{\max} 值变化不定。DG 出力水平为 100% 时, P_{\min} 和 P_{\max} 对应的网络重构情况如图 7 所示。

由图 7 可知, 考虑 DG 接入后, 变电站 1 和变电站 2 的转供能力均增强。对比图 6 和图 7(a), 以馈线 A 为例, DG 未接入时, 变电站 2 不能对变电站 1 内节点 6~10 的负荷转供。节点 6、7 接入 DG 后, 抬高了馈线 A 末端节点的电压, 可以实现转供。因此, DG 接入后, 变电站间的转供能力增强, 配电网与主网交换功率的灵活性范围增大。

P_{\min} 和 P_{\max} 的变化趋势可理解为: 随着 DG 接入容量增大, 减小了变电站 1 所需的供电功率, 同时变电站 2 的转供能力增大, 可对变电站 1 转供的负荷节点增多, 因此变电站 1 的 P_{\min} 减小; DG 接入容量增大时, 变电站 1 的转供能力增加, 使得 P_{\max} 增大, 另一方面, DG 的接入功率减小了变电站 1 的供电功率, 使得 P_{\max} 减小, 两者的共同作用使得 P_{\max} 的变化趋势不定。

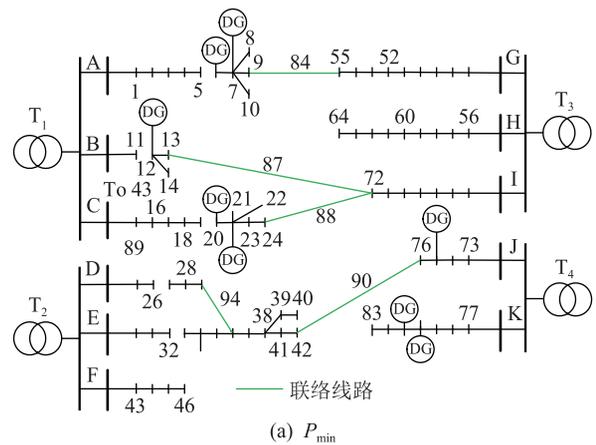
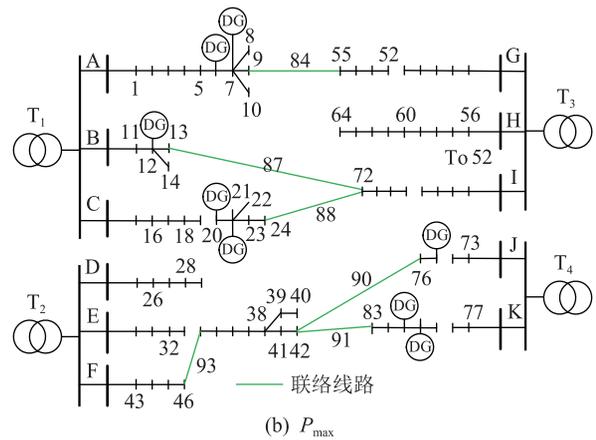
(a) P_{\min} (b) P_{\max}

图 7 考虑 DG 接入的网络重构情况

Fig.7 Network reconfiguration considering DG access

3.3 交直流混合配电网的交换功率灵活性范围

交直流混合配电网算例如图 5 所示, 通过直流联络线, 网络实现环网运行, 不同区域间通过直流联络线可实现功率传输。取 VSC 最小功率因素为 0.95, 电压调制系数为 0.95, 调制比^[26]为 $\sqrt{3}/2\sqrt{2}$, 转换效率为 95%。

VSC 容量取 3 000 kW·A, 求得的变电站 1、变电站 2 与主网交换功率的灵活性范围如表 3 所示。对比表 1 可知, 交直流混合配电网与主网的交换功率灵活性范围远大于交流配电网, 体现了交直流混合配电网灵活的转供能力。

表 3 交换功率灵活性范围

Table 3 Flexibility range of exchange power

名称	P_{\min}/kW	P_{\max}/kW
变电站 1	7 936	25 297
变电站 2	3 619	21 052

3.3.1 VSC 容量的影响

不考虑 DG 的接入, VSC 容量不同时, 变电站 1 与主网交换功率的灵活性范围如表 4 所示。

由表 4 可知, 随着 VSC 容量的增大, P_{\min} 值减小, P_{\max} 值增大, 交换功率灵活性范围逐渐增大。因

表4 变电站1交换功率灵活性范围
Table 4 Flexibility range of exchange power for substation 1

VSC容量/(kV·A)	P_{\min} /kW	P_{\max} /kW
1 000	13 591	19 728
2 000	10 706	22 940
3 000	7 936	25 297

为馈线之间通过直联络线进行功率的传输,其传输功率VSC容量的限制,VSC容量越大,线路可传输的功率越大,不同变电站之间的转供能力越强,变电站与主网交换功率灵活性范围越大。VSC容量为3 000 kV·A时, P_{\min} 和 P_{\max} 对应的网络重构拓扑如图8所示。

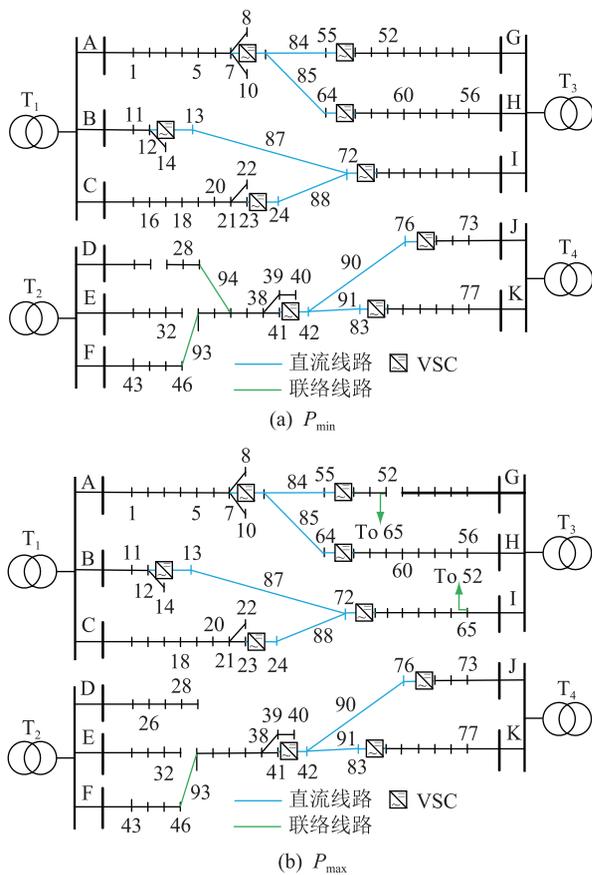


图8 交直流配电网重构情况

Fig.8 Network reconfiguration of AC/DC hybrid distribution network

由图8可知,交直流混合配电网中变电站1的 P_{\min} 和 P_{\max} 对应的场景中,网络重构较少。这是因为交直流混合配电网中变电站之间通过直联络线可以实现灵活的功率传输,实现不同区域之间负荷的转供;而交流配电网需要通过网络重构实现负荷的转供,且通过网络重构实现的变电站与主网交换功率灵活性范围小于交直流混合配电网。因此,交直流混合配电网的运行方式更加灵活。

3.3.2 DG出力水平的影响

取VSC容量为3 000 kV·A,DG出力水平不同时,交直流混合配电网和交流配电网中变电站1与主网交换功率灵活性范围如表5所示。

表5 变电站1交换功率灵活性范围
Table 5 Flexibility range of exchange power for substation 1

名称	交流配电网		交直流配电网	
	P_{\min}	P_{\max}	P_{\min}	P_{\max}
未接入DG	14 469	16 693	7 936	25 297
DG 20%	13 836	17 023	7 055	24 838
DG 50%	11 296	17 495	6 169	23 476
DG 100%	7 102	17 423	4 639	20 174

由表5可知,在VSC容量足够大时,交直流混合配电网与主网的交换功率灵活性范围均大于交流配电网。在DG接入容量较低时,优势更明显。考虑新能源出力具有随机性和波动性的特征,交直流混合配电网与主网的交换功率的灵活性范围更大,上级电网供电功率不足时,其应对能力更强。

随着DG接入容量的提高,交直流配电网中变电站1的 P_{\min} 和 P_{\max} 均减小。与3.2小结相对应,DG接入容量增加时,变电站2对变电站1的转供能力增强,变电站1需要传输的功率减小,因此 P_{\min} 减小;随着DG接入容量的增加,变电站1的转供能力增加,该因素使 P_{\max} 增大,变电站1需要传输的功率减小,该因素使 P_{\max} 减小,而交直流混合配电网的转供能力与直联络线有关,在VSC容量充足时,转供能力提升较小,因此第二个因素的影响较大,使得 P_{\max} 呈减小趋势。

4 结语

文中基于二阶锥规划,建立交直流混合配电网与主网交换功率评估模型,采用二阶锥松弛技术将非线性非凸模型转化为混合整数二阶锥规划模型,求解其与主网交换功率的灵活性范围,并选取94节点算例进行验证。结果表明,交直流混合配电网通过直联络线可实现灵活的功率传输,VSC容量足够大时,其转供能力远大于交流配电网,与主网交换功率的灵活性范围更大。在DG不同出力水平下交直流混合配电网与主网的交换功率灵活性范围均大于传统交流配电网,对DG的接纳能力更强。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018003)“面向高渗透率可再生能源和电动汽车接入的高灵活性交直流配电网规划技术研究”资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14,23.
WANG Chengshan, LI Peng. Distributed power generation, microgrid and smart distribution network development and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [2] 孙亮,张秀琦,吕凌虹,等. 含分布式电源的配电网电压控制策略研究[J]. 电网与清洁能源,2018,34(10):1-5,20.
SUN Liang,ZHANG Xiuqi, LYU Linghong, et al. Study on voltage control strategy for the distribution network with distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(10):1-5,20.
- [3] 程杉,苏高参. 基于 CAPSO 的含分布式电源的配电网动态重构[J]. 电网与清洁能源,2018,34(12):27-33,40.
CHENG Shan,SU Gaoshen. Dynamic reconfiguration of distribution network with distributed generations based on CAPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 27-33,40.
- [4] 罗迪,田新首,刘超,等. 分布式清洁能源接入配电网研究综述[J]. 电网与清洁能源,2017,33(8):101-108.
LUO Di, TIAN Xinshou, LIU Chao, et al. Summary of research on distributed clean power access distribution network [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 101-108.
- [5] 刘东,张弘,王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 2-7,20.
LIU Dong, ZHANG Hong, WANG Jianchun. Summary of research on active distribution network technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 2-7, 20.
- [6] 蒋煜,丁晓群,郑程拓,等. 含电动汽车的主动配电网分布式电源规划[J]. 广东电力,2017,30(7):1-6.
JIANG Yu, DING Xiaoqun, ZHENG Chengtuo, et al. Distributed generation planning for active distribution network with electric vehicle[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 1-6.
- [7] 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. Framework planning of active distribution network considering supply and demand interaction & DG operation characteristics [J]. Smart Power, 2018, 46(6): 81-87.
- [8] 郑程拓,丁晓群,郑能,等. 计及主动管理的含风电源主动配电网无功补偿规划[J]. 陕西电力,2017,45(6):30-35.
ZHENG Chengtuo, DING Xiaoqun, ZHENG Neng, et al. Reactive power compensation planning for active distribution network with wind power considering active management[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 30-35.
- [9] 雷金勇,李战鹰,卢泽汉,等. 分布式发电技术及其对电力系统影响研究综述[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 46-50.
LEI Jinyong, LI Zhanying, LU Zehan, et al. Overview of distributed generation technology and its impact on power system [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 46-50.
- [10] 张凡,余健明,马元社. 基于供电成本最小的配电网重构[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12): 71-74.
ZHANG Fan, YU Jianming, MA Yuanshe. Reconfiguration of distribution network based on minimum power supply cost[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(12): 71-74.
- [11] 顾明宏,孙为兵,顾颖歆,等. 综合无功优化与网络重构的配电网优化运行研究[J]. 电网与清洁能源,2017,33(7): 8-12,18.
GU Minghong, SUN Weibing, GU Yingxin, et al. Research on optimal operation of distribution network based on integrated reactive power optimization and network reconfiguration [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(7): 8-12, 18.
- [12] 殷豪,李德强,孟安波,等. 考虑分布式发电供电概率的配电网重构[J]. 电网与清洁能源,2017,33(9):113-118,123.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Distribution network reconstruction considering probability of distributed generation and power supply [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 113-118, 123.
- [13] 段青,赵阅群,颜磊,等. 以提高供电可靠性为目标的主动配电网负荷转供优化方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3155-3162.
DUAN Qing, ZHAO Yuequn, YAN Lei, et al. Optimization of load distribution for active distribution network with the goal of improving power supply reliability[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3155-3162.
- [14] 向育鹏,卫志农,孙国强,等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.
XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Optimal configuration of battery energy storage system in distribution network based on life cycle cost[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 264-270.
- [15] 罗运虎,王冰洁,梁昕,等. 电力市场环境下微电网不可再生分布式发电容量的优化配置问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 28-36.
LUO Yunhu, WANG Bingjie, LIANG Xin, et al. Optimal configuration of non-renewable distributed generation capacity of microgrid in power market environment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 28-36.
- [16] HELENO M, SOARES R, SUMAILI J, et al. Estimation of the flexibility range in the transmission-distribution boundary [C] //Power Technology, 2015 IEEE Eindhoven, IEEE, 2015.
- [17] 程浩忠,李隽,吴耀武,等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.
CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Considering the challenges and prospects of AC/DC transmission grid planning for high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27.
- [18] 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.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Current status and prospects

- of dc distribution network research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [19] 吴盛军, 王益鑫, 李强, 等. 低压直流供电技术研究综述[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 1-8.
- WU Shengjun, WANG Yixin, LI Qiang, et al. Review of low voltage DC power supply technology research [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 1-8.
- [20] 胡子珩, 马骏超, 曾嘉思, 等. 柔性直流配电网在深圳电网的应用研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 44-47.
- HU Ziheng, MA Junchao, ZENG Jiasi, et al. Application research of flexible DC distribution network in Shenzhen power grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 44-47.
- [11] LI N, CHEN L, LOW S H. Exact convex relaxation of OPF for radial networks using branch flow model [C] // 2012 Smart Grid Communications, Tainan; IEEE Third International Conference on, 2012:7-12.
- [22] MUNOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Joint expansion planning of distributed generation and distribution networks [C] // Power & Energy Society General Meeting, 2015.
- [23] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
- LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [24] SU C T, LEE C S. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 1022-1027.
- [25] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: Relaxations and convexification(part I)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2565-2572.
- [26] HOLMES D G, LIPO T A. Pulse width modulation for power converters: principles and practice[M]. IEEE Xplore, 2003.

作者简介:



程亮

程亮(1972),男,硕士,高级工程师,从事配电网规划工作(E-mail:chenliangsj@js.sgcc.com.cn);

黄河(1978),男,硕士,高级工程师,从事配电网规划及运行控制工作;

朱磊(1989),男,硕士,工程师,从事配电网优化规划工作。

Method of improving exchange power flexibility between AC/DC distribution network and transmission network

CHENG Liang¹, HUANG He¹, ZHU Lei¹, SUN Qirun², WU Zhi², HAN Jun³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Technical Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: With large-scale distributed generation access to distribution network, the uncertainty of network operation increases, active distribution network requires high observability and controllability of the network, AC/DC hybrid distribution network's operation is more flexible and reliable, it's the development trend of distribution network in the future. In this paper, network reconfiguration and DG reactive power compensation of active distribution network are considered. The exchange power evaluation model between AC/DC distribution network and transmission network based on second-order cone programming is established. So the exchange power flexibility range between distribution network and transmission network is solved. This range can provide a certain technical reference for the operation and dispatch of the distribution network and transmission network. Solution of 94-node example verifies the validity of the model. The results show that the AC/DC hybrid power distribution network has a larger flexible range than AC distribution network, VSC capacity and DG output level are related to the flexible range.

Keywords: AC/DC hybrid distribution network; exchange power; second-order cone programming; flexibility range

(编辑 方晶)