

含 DCPFC 的混合直流/交流联合电网无功优化

武 娇¹, 胡林献²

(1. 国网安徽省电力公司合肥供电公司, 合肥 230022;
2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 基于电流源换流器 (current source converter, CSC) 及电压源换流器 (voltage source converter, VSC) 的混合直流/交流联合电网输电技术是解决大规模、远距离电能输送和新能源并网的有效手段之一。本文首先建立了计及电压下垂控制方式和直流潮流控制器 (DC power flow controller, DCPFC) 的直流网络稳态模型, 在此基础上构建了考虑 VSC 精确损耗的混合直流/交流联合电网无功优化模型。通过算例仿真, 分析了交流系统发电机组出力、VSC 电压下垂参数以及 DCPFC 变比对联合电网有功损耗的影响。研究表明, 优化 VSC 电压下垂参数及 DCPFC 变比对降低全网有功损耗有重要作用。

关键词: 电气工程; 混合直流/交流联合电网; 电压下垂控制; 直流潮流控制器; 无功优化
中图分类号: TM74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2020)02-0168-10

Reactive power optimization of hybrid DC/AC combined power grid considering DCPFC

WU Jiao¹, HU Linxian²

(1. Hefei Power Supply Company of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Hybrid DC/AC combined power grid transmission technology based on current source converter (CSC) and voltage source converter (VSC) is one of the effective means to solve large-scale, long-distance power transmission and new energy grid connection. Firstly, the DC network steady-state model considering the voltage droop control method and DC power flow controller (DCPFC) is established. Based on this, a reactive power optimization model of hybrid DC/AC combined power grid considering the accurate loss of VSC is constructed. Through the simulation of the example, the influences of the AC system generator set output, the VSC voltage droop parameter and the DCPFC variable ratio on the active loss of the combined power grid are analyzed. Research result shows that the optimization of VSC voltage droop parameter and DCPFC variable ratio has an important effect on reducing the active loss of the whole network.

Key words: electrical engineering; hybrid DC/AC combined power grid; voltage droop control; DC power flow controller (DCPFC); reactive power optimization

0 引言

我国能源分布严重不均, 需要大规模、远距离的电能输送来满足东部沿海地区的电能需求; 与此同时, 传统火力发电带来的严重污染导致人类赖以生存的环境不断恶化, 从传统火力发电向风能、太阳能

作者简介: 武娇 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 交直流联合电网的无功优化

通信联系人: 胡林献, 教授, 主要研究方向: 高电压直流输电系统运行与控制、电力系统稳定性分析与控制、发电厂过程自动化等。
E-mail: linxian_hu@163.com

等清洁能源发电转型已经刻不容缓。不论是大规模、远距离的电能输送还是可再生能源并网，都宜采用高压直流输电的方式。近年来，“换流站少、工程造价低、可灵活切换传输方式且运行可靠性高^[1]”的直流电网受到越来越多国内外学者的关注。目前针对直流电网的研究才刚刚起步，文献[2]~[4]提出了直流网络典型拓扑结构图，指出了直流网络亟需解决的核心装备和关键技术问题，分析了直流电网在我国的应用前景和未来的研究方向。为灵活、便捷地控制直流网络潮流，有学者提出在直流线路中配置 DCPFC。文献[5]建立了含 DCPFC 的直流网络模型，提出了一种基于灵敏度分析的 DCPFC 配置方法，但该模型及方法仅适用于双端 DCPFC 控制单条线路潮流问题。文献[6]提出了一种能够同时控制多条线路潮流的多端口 DCPFC 拓扑结构，并为其稳定运行设计了相应的控制策略。

文献[7]~[10]指出，未来的直流电网必将是 VSC 和 CSC 并存的混合直流电网，涵盖两种换流器类型的混合直流电网会逐步实现与交流网络的大范围、跨区域互联，最终形成混合直流/交流联合电网。为提高输电经济效益，需要对这一新型网络架构进行无功优化。现有的无功优化大多是围绕交直流混联系统展开，文献[11]以交、直流线路有功损耗最小为目标函数，建立了交直流混联系统无功优化数学模型，但该模型换流器类型单一，且未考虑换流器控制方式及精确损耗。本文旨在对混合直流/交流联合电网进行无功优化，研究内容主要包括以下三个方面：

- 1) 建立计及 DCPFC 且换流器采用电压下垂控制方式的直流电网稳态模型；
- 2) 考虑换流器精确损耗，建立混合直流/交流联合电网的无功优化模型并对其求解；
- 3) 结合具体算例，分析各个优化控制变量对系统有功损耗的影响。

1 直流电网稳态模型

1.1 直流网络拓扑结构

直流电网不同于柔性多端直流输电系统，二者的拓扑结构如图 1 所示。

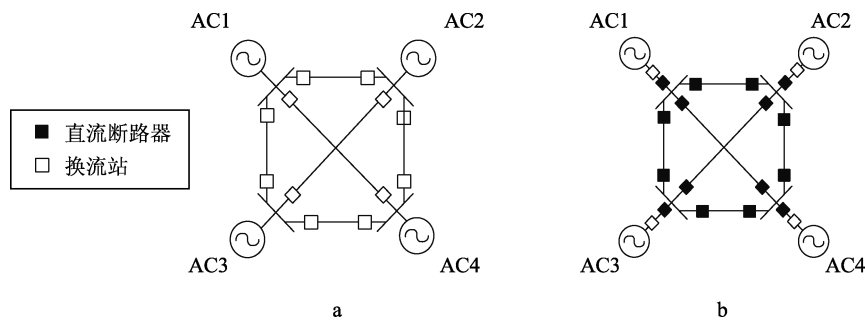


图 1 柔性多端直流输电系统 (a) 与直流电网 (b) 的拓扑结构

Fig. 1 Topology of flexible multi-terminal DC transmission system (a) and DC power grid (b)

柔性多端直流输电系统（如图 1a 所示）的每一条直流线路两端均装设一个换流站，换流站个数多，工程造价及运行维护费用高。而直流电网（如图 1b 所示）仅在每一个交流系统出口装设一个换流站，直流侧线路自由互联成网，凭借线路两端的高压断路器灵活控制线路的投切。直流电网存在大量冗余，线路间可互为备用，相比柔性多端直流输电系统，其运行可靠性更高。

1.2 计及 DCPFC 的直流电网稳态模型

不考虑 DCPFC 时，直流电网节点 i 的电流 I_{dci} 、电压 U_{dci} 、功率 P_{dci} 满足

$$I_{dci} = \frac{P_{dci}}{U_{dci}} = \sum_{j=1}^{n_{dc}} G_{dcij} U_{dcj}, \quad (1)$$

其中, j 为直流电网中与节点 i 相连的节点; G_{dcij} 为直流网络电导矩阵的元素; n_{dc} 为直流网络中与节点 i 相连的支路数。

在直流线路 L_{ij} 靠近节点 i 处安装变比为 $M_i:1$ 的 DCPFC 后, 直流网络电导矩阵仅以下元素发生变化, 其他元素不变:

$$\begin{cases} G'_{dcii} = -\left(\sum_{k=1, k \neq j}^{n_{dc}} G_{dcik} + M_i^2 G_{dcij}\right), \\ G'_{dcij} = G'_{dcji} = M_i G_{dcij}. \end{cases} \quad (2)$$

1.3 电压下垂控制下的直流电网稳态模型

直流电压控制方式直接影响混合直流/交流联合电网的运行特性, 为提高系统运行的可靠性, 本文换流器采用不依赖通信系统的电压下垂控制, 换流器输出功率不再是定值, 而是与直流电压成线性关系:

$$P_{dci} = P_{0i} + K_i(U_{0i} - U_{dci}), \quad (3)$$

其中, P_{0i} 、 U_{0i} 、 K_i 分别为采用 VSC 电压下垂控制的节点 i 参考功率、参考电压及电压下垂系数; U_{dci} 、 P_{dci} 分别为直流节点实际电压及 VSC 实际输出有功功率 (VSC 实际输出有功功率等于注入直流电网节点 i 的功率)。式 (1) 和式 (3) 联立可得电压下垂控制下的直流网络方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{P_{01} + K_1(U_{01} - U_{dc1})}{U_{dc1}} \\ \frac{P_{02} + K_2(U_{02} - U_{dc2})}{U_{dc2}} \\ \vdots \\ \frac{P_{0i} + K_i(U_{0i} - U_{dci})}{U_{dci}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{dc11} & G_{dc12} & \cdots & G_{dc1i} \\ G_{dc21} & G_{dc22} & \cdots & G_{dc2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{dci1} & G_{dci2} & \cdots & G_{dcii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dc1} \\ U_{dc2} \\ \vdots \\ U_{dci} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2 混合直流/交流联合电网无功优化模型

2.1 目标函数

混合直流/交流联合电网的无功优化以全网络有功损耗最小为优化目标, 有功损耗包括交流线路损耗、直流线路损耗以及换流器损耗 (考虑到 VSC 损耗远大于 CSC 损耗, 为简化计算, CSC 损耗忽略不计):

$$\min F = P_{acL} + P_{dcL} + P_{loss}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{acL} = \sum_{k=1}^{n_1} G_{k(i,j)} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)], \\ P_{dcL} = \sum_{k=1}^{n_2} I_{dck}^2 R_{dck}, \\ P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_3} P_{lossi}, \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_{acL} 、 P_{dcL} 分别为交、直流线路有功损耗; $G_{k(i,j)}$ 为交流系统中第 k 条支路上的电导; U_i 、 U_j 分别为交流系统中节点 i 、 j 的电压幅值; θ_i 、 θ_j 分别为交流系统中节点 i 、 j 的电压相角; I_{dck} 、 R_{dck} 分别为直

流网络中第 k 条支路上的电流、电阻； n_1 、 n_2 、 n_3 分别为交流系统、直流系统的支路数以及 VSC 个数； P_{loss} 为 VSC 有功损耗，其精确计算模型参照 IEC62751 标准，表示为 VSC 电流标么值的二次函数形式^[12]，如式 (7) 所示。

$$P_{\text{loss}i} = a_i I_{\text{dci}}^2 + b_i I_{\text{dci}} + c_i, \quad (7)$$

其中， a_i 、 b_i 、 c_i 为换流器损耗系数，应根据各换流器出厂参数与换流站实际工作情况来设定； I_{dci} 为换流器电流标么值。

2.2 等式约束条件

等式约束条件包括：考虑 DCPFC 的电导矩阵修改方程[式 (2)]、考虑电压下垂控制方式的直流网络方程[式 (4)]、VSC 基本方程、CSC 基本方程、交流网络功率平衡方程及直流网络功率平衡方程。

2.2.1 VSC 基本方程

$$\begin{cases} P_{si} = \frac{U_{si} U_{ci}}{X_{ti}} \sin \delta_i, \\ Q_{si} = \frac{U_{si} (U_{si} - U_{ci} \cos \delta_i)}{X_{ti}} + \frac{U_{si}^2}{X_{fi}}, \\ U_{dci} = \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_{pi} U_{ci}, \end{cases} \quad (8)$$

其中， $U_{si} \angle \theta_{si}$ 、 $U_{ci} \angle \theta_{ci}$ 分别为与换流站相连的交流节点端电压和 VSC 输出基波电压； P_{si} 、 Q_{si} 分别为交流系统流入换流变压器的有功、无功功率； X_{ti} 为换流变压器等效电抗； X_{fi} 为交流滤波器阻抗； U_{dci} 为直流侧电压； δ_i 为交流节点与换流器节点端电压相角差；VSC 采用脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM)， $\mu_i (0 \leq \mu_i \leq 1)$ 为直流电压利用率， $M_{pi} (0 \leq M_{pi} \leq 1)$ 为调制度。

2.2.2 CSC 基本方程

$$\begin{cases} U_{dci} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} r_i U_{ti} \cos \alpha_i - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_{dci}, \\ P_{dci} = U_{dci} I_{dci}, \\ Q_{di} = I_{dci} \sqrt{1.8r_i^2 U_{ti}^2 - U_{dci}^2} \cdot \text{Sign}, \end{cases} \quad (9)$$

其中， U_{ti} 为交流节点电压；换流变压器变比为 $r_i : 1$ ； X_{ci} 为换流器的换相电抗； α_i 为换流器控制角； Q_{di} 为交流系统流入 CSC 的无功功率；Sign 为符号函数，整流为正，逆变为负。

2.2.3 交流网络功率平衡方程

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} + P_{Ti} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_{Ci} + Q_{Ti} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}), \end{cases} \quad (10)$$

其中， ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为不平衡有功功率、无功功率； P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电机有功出力、无功出力； P_{Li} 、

Q_{Li} 分别为有功负荷、无功负荷; G_{ij} 为交流网络电导矩阵的元素; B_{ij} 为交流网络电纳矩阵的元素; δ_{ij} 为交流节点 i 与交流节点 j 的相角差; Q_{Ci} 为节点 i 补偿的无功功率; 对于普通交流节点, P_{Ti} 、 Q_{Ti} 均为 0; 对于与换流器直接相连的交流节点, P_{Ti} 、 Q_{Ti} 表示直流网络注入交流节点 i 的有功功率、无功功率, 其中 P_{Ti} 可具体表示为

$$P_{Ti} = P_{dci} - P_{lossi} \quad (11)$$

2.2.4 直流网络功率平衡方程

$$\Delta P_{dci} = P_{Gdci} - P_{Ldci} - P_{Tdci} - U_{dci} \sum_{j=1, j \neq i}^{n_{dc}} G_{dcij} (U_{dcj} - U_{dci}), \quad (12)$$

其中, P_{Gdci} 、 P_{Ldci} 分别为直流节点相应的发电机有功出力及有功负荷; P_{Tdci} 为直流网络注入交流节点 i 的功率。

2.3 不等式约束条件

2.3.1 交流网络运行约束

交流网络运行约束包括: 发电机有功、无功上下限约束, 节点电压幅值、相角约束以及交流线路有功、无功上下限约束。

$$\begin{cases} P_{Gi.min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi.max}, \\ Q_{Gi.min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi.max}, \\ U_{si.min} \leq U_{si} \leq U_{si.max}, \\ \theta_{si.min} \leq \theta_{si} \leq \theta_{si.max}, \\ P_{Lij.min} \leq P_{Lij} \leq P_{Lij.max}, \\ Q_{Lij.min} \leq Q_{Lij} \leq Q_{Lij.max}, \end{cases} \quad (13)$$

其中, P_{Lij} 、 Q_{Lij} 分别为交流线路上流过的有功功率、无功功率。

2.3.2 直流网络运行约束

直流网络运行约束包括直流节点电压、直流线路功率上下限约束和 DCPFC 变比上下限约束。

$$\begin{cases} U_{dci.min} \leq U_{dci} \leq U_{dci.max}, \\ P_{dcLij.min} \leq P_{dcLij} \leq P_{dcLij.max}, \\ M_{i.min} \leq M_i \leq M_{i.max}, \end{cases} \quad (14)$$

其中, P_{dcLij} 为直流线路上流过的功率。

2.3.3 换流站运行约束

换流站运行约束包括: VSC 换流站调制度上下限约束, VSC 下垂控制参考功率、参考电压及电压下垂系数上下限约束。

$$\begin{cases} M_{pi.min} \leq M_{pi} \leq M_{pi.max}, \\ P_{0i.min} \leq P_{0i} \leq P_{0i.max}, \\ U_{0i.min} \leq U_{0i} \leq U_{0i.max}, \\ K_{i.min} \leq K_i \leq K_{i.max}. \end{cases} \quad (15)$$

3 算例分析

3.1 仿真条件

本文选取数值鲁棒性强，对初值选取不敏感的原对偶内点法^[13~15]对算例系统进行求解。三个海上风电场分别通过 VSC1、VSC2、VSC3 与直流电网相连，同时直流网络通过 VSC4、VSC5、CSC6 与交流网络互联，交流网络由 IEEE14 和 IEEE4 节点交流系统修改得到。VSC1、VSC2、VSC3、CSC6 均采用定有功功率控制，其中 $P_{dcvsc1}^{sp} = 0.8$, $P_{dcvsc2}^{sp} = 0.7$, $P_{dcvsc3}^{sp} = 0.5$, $P_{dcsc6}^{sp} = -0.6$ ；VSC4、VSC5 均采用电压下垂控制。VSC 其他参数： $X_{ti} = 0.15$ ，换流变压器和换流器内部损耗的等效电阻 $R_{dci} = 0.006$, $X_{fi} = 400$ （单位均为 p.u.）；VSC 损耗系数均取： $a = 0.01$, $b = 0.03$, $c = 0.01$ 。算例系统拓扑结构如图 2 所示，直流线路电阻参数如表 1 所示，发电机组出力约束如表 2 所示，不同场景下的控制参数如表 3 所示。

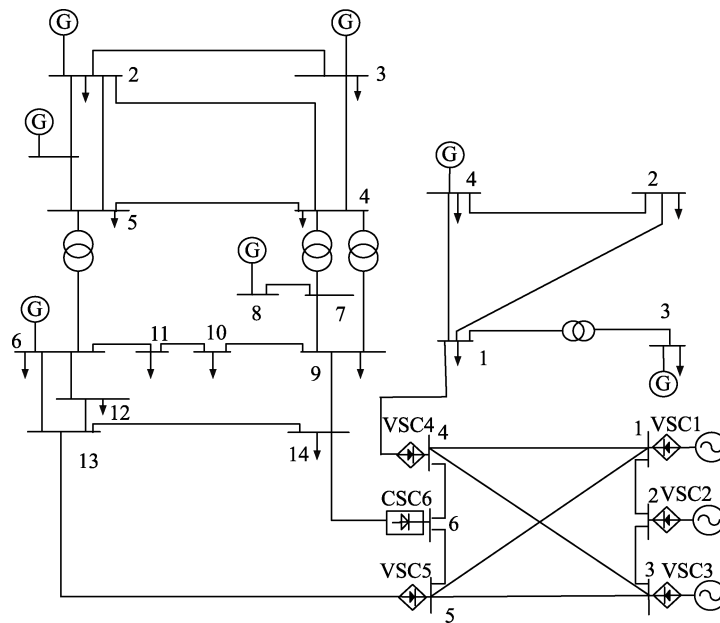


图 2 算例系统拓扑结构

Fig. 2 Topology of the example system

表 1 直流线路电阻参数

Tab. 1 Resistance parameters of DC line

首端编号	末端编号	直流线路电阻/p.u.	首端编号	末端编号	直流线路电阻/p.u.
1	2	0.20	3	4	0.12
1	4	0.08	3	5	0.08
1	5	0.12	5	6	0.03
2	3	0.02	4	6	0.02

表 2 发电机组出力约束 (p.u.)

Tab. 2 Constraints on generator set output (p.u.)

发电机组编号	有功		无功		发电机组编号	有功		无功	
	下限	上限	下限	上限		下限	上限	下限	上限
IEEE14-1	1.25	2.50	-1.25	1.25	IEEE14-8	1.25	2.50	-1.25	1.25
IEEE14-2	0.75	1.50	-0.75	0.75	IEEE4-3	1.00	2.00	-1.00	1.00
IEEE14-3	2.00	4.00	-2.00	2.00	IEEE4-4	1.00	2.00	-1.00	1.00
IEEE14-6	1.25	2.50	-1.25	1.25					

为对所提模型和方法的各方面性能进行验证, 设置以下两种不同场景进行仿真分析。

场景 1: 仅考虑发电机组出力调整的混合直流/交流联合电网无功优化。除算例基本参数外, VSC 换流器控制参数给定, 参见表 3 场景 1 一栏数据。

场景 2: 在场景 1 的基础上, 考虑线路 L_{12} 安装有变比可调范围为 0.985~1.005 的 DCPFC, 追加 VSC4、VSC5 控制参数及 DCPFC 变比为优化变量的混合直流/交流联合电网无功优化, VSC 控制参数可调范围参见表 3 场景 2 一栏数据。

表 3 场景 1、场景 2 的 VSC 控制参数对比
Tab. 3 VSC control parameters comparison of scenes 1 and 2

参数	场景 1		场景 2	
	VSC4	VSC5	VSC4	VSC5
电压下垂系数	50	50	0.5~70	0.5~70
参考功率/p.u.	-0.4	-1.0	-2~2	-2~2
参考电压/p.u.	2.0	2.0	1.96~2.03	1.96~2.03

3.2 仿真结果分析

对比分析两种不同场景的无功优化计算结果, 场景 1 无功优化计算结果为 OPF1, 场景 2 无功优化计算结果为 OPF2。

3.2.1 节点电压幅值和相角对比

以 14 节点交流系统为例, 两场景最优解对应的节点电压幅值、相角对比如图 3 所示。

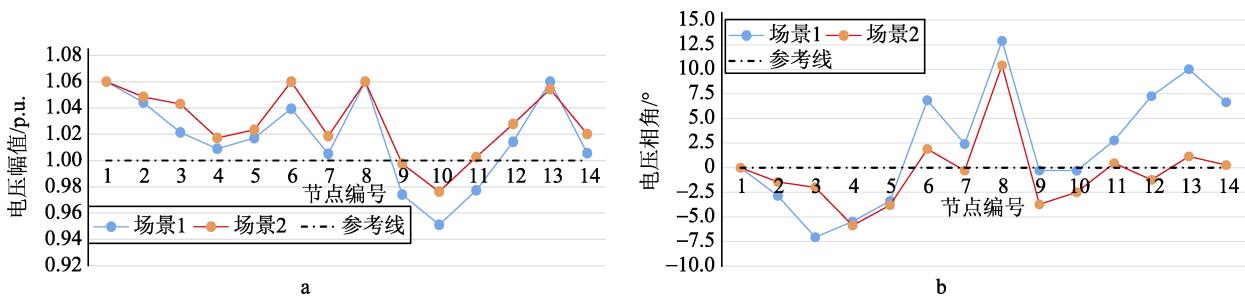


图 3 场景 1、场景 2 最优解对应的 14 节点交流系统电压对比
Fig. 3 14-node AC system voltage comparison corresponding to the optimal solution of scenes 1 and 2
a—电压幅值对比; b—电压相角对比

a-Voltage amplitude comparison; b-Voltage phase angle comparison

节点电压幅值和相角与系统有功损耗密切相关。线路两端电压相量差越小, 线路上的有功损耗也就越小。对比场景 1 与场景 2 节点电压幅值和相角的计算结果可以看出: 场景 2 各节点电压幅值更接近于参考线 1.00 p.u., 相角更接近于参考线 0°, 各节点电压幅值差、相角差更小, 线路上的有功损耗也就更小。这说明优化 VSC 换流器参数和 DCPFC 变比能够进一步调节网络潮流分布, 降低线路上的有功损耗。

另外, 由图 3 不难看出, 节点 10 电压偏低, 这是由于与该节点相连的线路上的无功功率不足且该节点无功负荷较大, 所以该节点电压降低, 但电压偏差在允许范围内。在调节发电机节点有功功率以降低线路有功损耗的同时, 如何调节发电机节点无功功率以保证各节点电压稳定还待进一步研究。

3.2.2 各部分损耗对比

有功损耗是衡量混合直流/交流联合电网无功优化效果的重要指标。场景 1 和场景 2 的各部分损耗如表 4 所示。

表 4 场景 1、场景 2 各部分损耗计算结果 (MW)

Tab. 4 Loss calculation results for various parts of scenes 1 and 2 (MW)

场景	IEEE14 损耗	IEEE4 损耗	直流线路损耗	换流站损耗	全网总损耗
1	12.909 2	0.908 1	2.713 0	7.380 4	23.910 7
2	7.178 9	0.853 4	2.569 9	7.321 4	17.923 6

由表 4 的数据可以看出, 仅调节发电机组出力时, 全网总损耗为 23.910 7 MW, 而在此基础上追加换流器控制参数及 DCPFC 变比为优化变量, 则损耗会进一步降低 5.987 1 MW. 这说明, 优化换流器参数及 DCPFC 变比对降低全网网络损耗有重要作用。

为分析 VSC 换流器各参数以及 DCPFC 变比对联合电网有功损耗产生的影响, 将各单一优化变量优化前后对应的数值以及优化前后的网损差值绘制成表 5.

表 5 各单一优化变量的优化效果

Tab. 5 Optimization effect of each single optimization variable

优化变量	场景 1		场景 2		网损减少/MW
	VSC4	VSC5	VSC4	VSC5	
电压下垂系数	50	50	70	70	0.233 6
参考功率/p.u.	-0.4	-1.0	-1.32	-0.08	3.428 8
参考电压/p.u.	2.0	2.0	1.984	2.021	4.174 7
DCPFC 变比	1		0.987		0.342 6

经仿真分析得出, 仅优化电压下垂系数, 网络损耗降低 0.233 6 MW; 优化 VSC4 和 VSC5 参考运行点 (参考功率或参考电压) 能够大大降低网络损耗, 优化效果显著; 优化 DCPFC 变比能够明显降低直流线路损耗, 但对交流网络损耗影响不大。对比表 4、表 5 可知, 单一优化变量最多使网损降低 4.174 7 MW, 而综合优化多个优化变量可使网损降低 5.987 1 MW, 多优化变量综合优化的效果优于单一优化变量的优化效果。

优化交流系统发电机组出力实际就是使靠近负荷中心的发电机组多出力, 远离负荷中心的发电机组少出力, 直接减少线路上的电能输送, 从而降低交流网络有功损耗; 优化 VSC 可控参数实际就是调节直流网络注入交流网络的功率大小。与换流器相连的交流节点由于直流网络功率的注入可等效为发电量可调的发电机节点, 相当于交流网络拥有了更多的可调发电机组, 依据负荷分布合理地分配各发电机组出力能够进一步降低交流网络有功损耗; 对于安装 DCPFC 的直流线路, 优化 DCPFC 变比实际就是直接改变直流线路参数, 能够显著降低直流线路有功损耗。总之, 调节发电机组出力、优化 VSC 参数以及改变 DCPFC 变比能够不同程度地降低网络有功损耗, 综合这些优化措施能够使无功优化效果达到最佳。

4 结论

本文首先建立了计及 DCPFC 和 VSC 电压下垂控制方式的直流网络稳态模型, 构建了考虑 VSC 精确损耗的混合直流/交流联合电网无功优化模型, 并在传统交流电网优化变量的基础上拓展了换流器及直流网络优化变量。算例仿真表明, 换流器参数及 DCPFC 变比对降低全网网络损耗有重要作用, 且多个优化变量的综合优化效果要优于单一优化变量的优化效果。

[参考文献] (References)

- [1] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (13): 7-12.
WEN J L, WU R, PENG C, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12. (in Chinese)
- [2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (10): 8-17.
TANG G F, LUO X, WEI X G. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17. (in Chinese)
- [3] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36 (4): 1-9.
LIANG X M, ZHANG P, CHANG Y. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9. (in Chinese)
- [4] 严胜, 罗湘, 贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (3): 205-215.
YAN S, LUO X, HE Z Y. Prospect of core equipment and key technology for DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 205-215. (in Chinese)
- [5] 王第成, 胡林献, 邱迪. 电压型直流潮流控制器优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (21): 78-83.
WANG D C, HU L X, QIU D. Optimal locating method of voltage-type DC power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 78-83. (in Chinese)
- [6] 王鹤, 边竞, 李国庆, 等. 适用于柔性直流电网的多端口直流潮流控制器[J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (22): 102-108. (in Chinese)
WANG H, BIAN J, LI G Q, et al. Multi-port DC power flow controller for flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 102-108. (in Chinese)
- [7] 冯明, 李兴源, 李宽. 混合直流输电系统综述[J]. 现代电力, 2015, 32 (2): 1-8.
FENG M, LI X Y, LI K. A review on hybrid HVDC system[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 1-8. (in Chinese)
- [8] 刘耀华, 裴玮, 杨艳红, 等. 多端直流的交直流配电网潮流计算[J]. 电力建设, 2016, 37 (5): 83-90.
LIU Y H, PEI W, YANG Y H, et al. Power flow calculations for AC/DC hybrid distribution network with multi-terminal DC[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 83-90. (in Chinese)
- [9] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (7): 156-167.
WANG Y P, ZHAO W Q, YANG J M, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167. (in Chinese)
- [10] 彭磊, 张建平, 吴耀武, 等. 基于 GA、PSO 结合算法的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2006, 32 (4): 78-81.
PENG L, ZHANG J P, WU Y W, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 78-81. (in Chinese)
- [11] 杜睿山, 于辉, 李阳. 交直流混合电力系统的无功优化研究[J]. 西南民族大学学报 (自然科学版), 2008, 34 (6): 1233-1237.
DU R S, YU H, LI Y. The reactive optimizing research of the AC-DC mixed electric power systems[J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2008, 34(6): 1233-1237. (in Chinese)
- [12] 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 J H, LI Z C, WANG X J, 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)

- [13] 江全元, 耿光超. 含高压直流输电系统的内点法最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (25): 43-49.
JIANG Q Y, GENG G C. Interior-point optimal power flow with the high voltage direct current transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 43-49. (in Chinese)
- [14] 耿光超, 江全元. 基于自动微分技术的内点法最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (23): 41-45.
GENG G C, JIANG Q Y. An automatic differentiation based interior-point method for optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 41-45. (in Chinese)
- [15] 覃智君, 阳育德, 吴杰康. 矢量化动态最优潮流计算的步长控制内点法实现[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (7): 52-58.
QIN Z J, YANG Y D, WU J K. Step-controlled primal-dual interior point method implementation for vectorial dynamic optimal power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 52-58. (in Chinese)

(责任编辑: 张媛媛)