

Influence of VSC Voltage Droop Parameter on Network Loss of AC/DC Combined Power Grid

Jiao Wu, Linxian Hu

School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang
Email: 2020763968@qq.com, linxian_hu@163.com

Received: May 13th, 2019; accepted: May 29th, 2019; published: Jun. 5th, 2019

Abstract

At present, as for AC/DC combined power grid, most of its DC voltage control methods use voltage droop control. In order to improve the system operation reliability and reduce the network loss under the droop control mode, this paper explores the influence of the controllable parameters of the VSC voltage droop control on the system network loss. Firstly, the AC-DC combined grid network loss calculation model considering the converter loss and the DC grid steady-state model under the VSC voltage droop control mode are established. The principle of VSC droop control and the influence of different parameters on the P-V characteristic curve are analyzed. Through the simulation of the example, the DC voltage fluctuation and the network loss optimization effect when adjusting the different control parameters of the converter are compared. Finally, it is concluded that the network loss optimization effect of adjusting the droop control reference power is good and can guarantee the safe and stable operation of the system. It is an effective reactive power optimization measure.

Keywords

AC/DC Combined Power Grid, Voltage Droop Control, VSC Parameters, Combined Power Grid Loss

VSC电压下垂参数对交直流联合电网网损的影响

武 娇, 胡林献

哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: 2020763968@qq.com, linxian_hu@163.com

收稿日期: 2019年5月13日; 录用日期: 2019年5月29日; 发布日期: 2019年6月5日

摘要

交直流联合电网直流电压的控制方式大多采用电压下垂控制, 为提高系统运行可靠性, 降低下垂控制方式下的网络损耗, 本文探究了VSC电压下垂控制的可控参数对系统网损的影响。首先建立了计及换流器损耗的交直流联合电网网损计算模型和VSC电压下垂控制方式下直流电网稳态模型, 分析了VSC下垂控制原理和不同参数对P-V特性曲线的影响。通过算例仿真, 比较了调节换流器不同参数时的直流电压波动情况和网损优化效果。最后得出结论: 调节下垂控制参考功率的网损优化效果较好且能够保证系统安全稳定运行, 是一种有效的无功优化措施。

关键词

交直流联合电网, 电压下垂控制, VSC参数, 联合电网网损

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高压直流输电技术是解决远距离大容量电能输送、可再生能源并网以及多个不同频率的交流系统互联问题的有效手段之一, 其发展经历了从常规直流输电、常规多端直流输电到柔性直流输电、柔性多端直流输电再到直流电网的历程[1]。目前柔性多端直流输电技术已较为成熟, 全球已有多个工程建成投运, 包括中国的南澳三端柔性直流输电工程、舟山柔性五端直流输电科技示范工程以及美国的 Tres Amigas 超导体输电工程等[2]。随着研究深入, “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”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开始, 未来逐渐成熟的直流电网将与交流电网逐步实现互联, 形成交直流联合电网这一新型网络架构[3]。换流器是连接直流电网与交流电网的关键设备。文献[4] [5] [6]从不同角度分析了电流源换流器(CSC)与电压源换流器(VSC)的运行特性, 比较了二者的技术特点和应用领域, 指出 VSC 可实现有功、无功独立解耦控制, 控制方式更加灵活且无需额外的无功功率补偿及通信联络设备建设, 满足无源网络、远距离孤立负荷、海上钻井平台等特殊场合供电需求, 较之 CSC 更适用于实现交、直流电网互联。

直流电压是联合电网运行稳定性的重要指标, 其控制方式中应用较为广泛的是主从控制和电压下垂控制。文献[7] [8] [9]对交直流联合电网直流侧电压的控制方式进行了研究。文献[7]结合两种控制方式的优点修正了 P-V 曲线, 解决了控制模式切换过程中暂态时间过长的的问题。文献[8]认为现有的电压下垂控制方式未考虑扰动后直流网络功率重新分配给交流网络带来的影响, 提出了一种适用于 VSC-HVDC 的改进电压下垂控制方法, 该方法依据交流网络频率偏移自动调节响应换流站的电压下垂系数, 从而合理分配扰动带来的功率不平衡量。文献[9]提出电压下垂系数设置不合理会导致系统失稳, 可通过实时监测直流侧电压动态修正电压下垂系数, 从而保证系统安全稳定运行。目前国内外学者对电压下垂控制的改进大多是围绕协调优化下垂系数展开, 对下垂控制的其它参数(如: 参考电压、参考功率)的优化研究还很少。本文旨在将这些可控参数与系统网损联系起来, 探究这些参数对直流电压和系统网损的影响。

2. 交直流联合电网网损计算模型

网损是系统运行经济性的重要指标。交直流联合电网网损如式(1)所示。

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{acL}} + P_{\text{dcL}} + P_{\text{vsc}} \quad (1)$$

式中: P_{loss} 表示联合电网总网络损耗; $P_{\text{acL}}, P_{\text{dcL}}, P_{\text{vsc}}$ 分别表示交流、直流线路有功损耗及 VSC 换流器总损耗, 其具体计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{acL}} = \sum_{k=1}^{n_1} G_{k(i,j)} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)) \\ P_{\text{dcL}} = \sum_{k=1}^{n_2} I_{\text{dk}}^2 R_{\text{dk}} \\ P_{\text{vsc}} = \sum_{i=1}^{n_r} P_{\text{vsci}} = \sum_{i=1}^{n_r} (a_i I_{\text{ci}}^2 + b_i I_{\text{ci}} + c_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_1, n_2, n_r 分别表示交、直流线路数目以及 VSC 换流器个数; $G_{k(i,j)}$ 表示第 k 条交流线路的电导; $I_{\text{dk}}, R_{\text{dk}}$ 分别表示第 k 直流线路的电流、电阻; P_{vsci} 表示第 i 个 VSC 换流器损耗, 根据文献[10] [11] [12] 可知, VSC 换流器损耗可表示为关于电流标么值的二次函数形式, 其系数 a_i, b_i, c_i 表示换流器损耗系数, 应由 VSC 出厂参数及实际工况来设定。

3. 交直流联合电网直流电压控制方式

3.1. 直流电压控制方式分类

直流侧电压控制方式可分为主从控制、电压裕度控制和电压下垂控制。在主从控制中, 一般选择一个容量较大的换流站作为主换流站, 主站采用定直流电压控制, 其余从站采用定有功功率控制, 一旦系统内出现功率波动则由主站承担这部分功率差额, 若主站故障或超出主站可承担范围, 则依靠通信系统发出指令, 指定某一从站接替主站维持系统内功率平衡。电压裕度控制是对主从控制的改进, 一旦主站发生故障, 从站能够自动转换控制模式接替主站维持系统电压稳定。在电压下垂控制中, 多个换流站工作在电压下垂控制方式下, 一旦系统内出现功率波动就由这部分换流站依据各自的电压下垂系数来分担功率差额。由于电压下垂控制相比主从控制和电压裕度控制具有更多的换流站参与维持系统功率平衡, 其系统运行可靠性更高且换流站之间不依赖通信系统, 能够依据各自的电压下垂系数自动切换工作点, 因此更适用于交直流联合电网。

3.2. 电压下垂控制原理

在直流电网中, 直流线路上的电压损耗很小, 可近似认为直流网络各节点电压相等。电压下垂控制原理可以用 P-V 特性曲线来描述, 如图 1 所示。

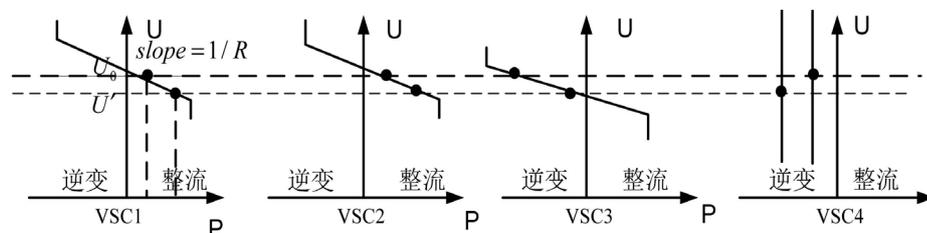


Figure 1. Principle of voltage droop control

图 1. 电压下垂控制原理

由图 1 可知, VSC1、VSC2、VSC3 采用电压下垂控制, 其电压或功率不再恒定不变而是满足以下线性关系:

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

式中: P_{di} 表示换流器实际输出功率; U_{di} 表示换流器节点实际电压; P_{0i}, U_{0i}, K_i 均为 VSC 换流器可控参数, 分别表示 VSC 换流器下垂控制的参考功率, 参考电压及电压下垂系数。对单个换流站而言, 参考功率, 参考电压确定了 P-V 特性曲线的参考运行点, 电压下垂系数确定了 P-V 特性曲线斜率, 这三个参数共同决定了该换流站的运行特性。调节换流站三个可控参数中的任意一个即可调节换流站输出功率, 本文旨在分析三个可控参数对联合电网网损的影响, 从中选出调节灵敏度高且能保证系统稳定运行的优化参数, 将其作为电压下垂控制方式下交直流联合电网无功优化的首选优化参数。

VSC4 采用定功率控制, 当 VSC4 出现功率波动时, 换流站的工作电压均由 U_0 变为 U' , VSC1、VSC2、VSC3 会沿着各自的 P-V 特性曲线寻找新的工作点, 从而使系统重新回到功率平衡。多个换流站共同承担维持系统功率平衡的任务, 增加了系统的运行可靠性。

3.3. 电压下垂控制下的直流电网模型

直流电网参数简单, 其基本模型可以描述为:

$$I_{di} = \frac{P_{di}}{U_{di}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{vsc}}} G_{ij} U_{dj} \quad (4)$$

式中: U_{di}, I_{di}, P_{di} 分别表示直流节点 i 的电压、电流和有功功率; G_{ij} 表示直流网络电导矩阵的元素。VSC 换流器采用电压下垂控制, 其直流电网模型也应做出相应的调整, 直流网络基本方程式(4)可依据公式(3)修改为:

$$\begin{bmatrix} \frac{P_{01} + K_1 (U_{01} - U_{d1})}{U_{d1}} \\ \frac{P_{02} + K_2 (U_{02} - U_{d2})}{U_{d2}} \\ \vdots \\ \frac{P_{0i} + K_i (U_{0i} - U_{di})}{U_{di}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{12} & G_{22} & \cdots & G_{12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{1n} & G_{12} & \cdots & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{d2} \\ \vdots \\ U_{di} \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. 算例分析

4.1. 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][14][15]对算例系统进行求解。交流网络由 IEEE14 和 IEEE4 节点交流系统修改而来, 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 与交流网络实现互联。VSC1~VSC4 均采用定有功功率控制, 其控制量分别为 $P_{\text{dvsc1}}^{\text{sp}} = 0.8, P_{\text{dvsc2}}^{\text{sp}} = 0.7, P_{\text{dvsc3}}^{\text{sp}} = 0.5, P_{\text{dvsc4}}^{\text{sp}} = -0.6$; VSC5、VSC6 均采用电压下垂控制, VSC 其它参数: $X_L = 0.15, R = 0.006, X_r = 400$; VSC 损耗系数均取: $a = 0.01, b = 0.03, c = 0.01$ 。交流系统发电机组出力可调, 调节范围参见表 1, 为探究 VSC5、VSC6 不同下垂控制参数对系统网损的影响, 进行四组仿真实验, 实验参数对比详见表 2, 算例系统拓扑结构如图 2 所示。

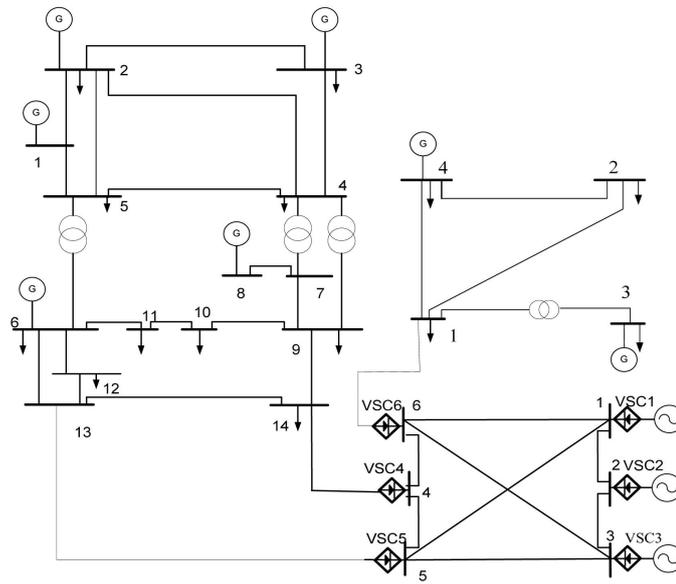


Figure 2. Topology of the example system
图 2. 算例系统拓扑结构

Table 1. Constraints on generator output
表 1. 发电机组出力约束

发电机组 编号	有功(pu)		无功(pu)	
	下限	上限	下限	上限
IEEE14-1	1.25	2.5	-1.25	1.25
IEEE14-2	0.75	1.5	-0.75	0.75
IEEE14-3	2	4	-2	2
IEEE14-6	1.25	2.5	-1.25	1.25
IEEE14-8	1.25	2.5	-1.25	1.25
IEEE4-3	1	2	-1	1
IEEE4-4	1	2	-1	1

Table 2. Comparison of droop control parameters of VSC5 and VSC6 in four groups of experiments
表 2. 四组实验的 VSC5、VSC6 下垂控制参数对比

组别	VSC 可控 参数	参考功率		参考电压		电压下垂系数	
		VSC5	VSC6	VSC5	VSC6	VSC5	VSC6
对照组	-	-1.0	-0.4	2.0	2.0	50	50
实验组 1	参考功率	-2.0~2.0	-2.0~2.0	2.0	2.0	50	50
实验组 2	参考电压	-1.0	-0.4	1.96~2.03	1.96~2.03	50	50
实验组 3	下垂系数	-1.0	-0.4	2.0	2.0	0.5~70	0.5~70

4.2. 仿真结果分析

为探究 VSC 下垂控制不同参数对系统网损的影响, 设置以下三种不同场景进行对比分析。

场景 1: 探究 VSC 参考功率对系统网损的影响。设置对照组和实验组 1 进行对比试验, 对照组的所有参数随机给定, 实验组 1 的电压下垂系数和参考电压给定, 参考功率可调, 其调节范围均为 -2.0 pu 至 2.0 pu, 对比两组实验系统网损计算结果。

场景 2: 探究 VSC 参考电压对系统网损的影响。设置对照组和实验组 2 进行对比试验, 对照组的所有参数均给定, 实验组 2 的电压下垂系数和参考功率给定, 参考电压可调, 其调节范围均为 -1.96 pu 至 2.03 pu, 对比两组实验系统网损计算结果。

场景 3: 探究 VSC 电压下垂系数对系统网损的影响。设置对照组和实验组 3 进行对比试验, 对照组的所有参数均给定, 实验组 VSC4、VSC5 的电压下垂系数和参考功率给定, 参考功率可调, 其调节范围均为 0.5 至 70 , 对比两组实验系统网损计算结果。

1) 直流电压对比

在调节 VSC 电压下垂参数的过程中, 一旦直流电压随功率波动过大就很可能造成系统失稳, 因此要将系统运行的稳定性放在首位, 保证在调优过程中直流电压波动不大。四组实验直流电压对比如图 3 所示。

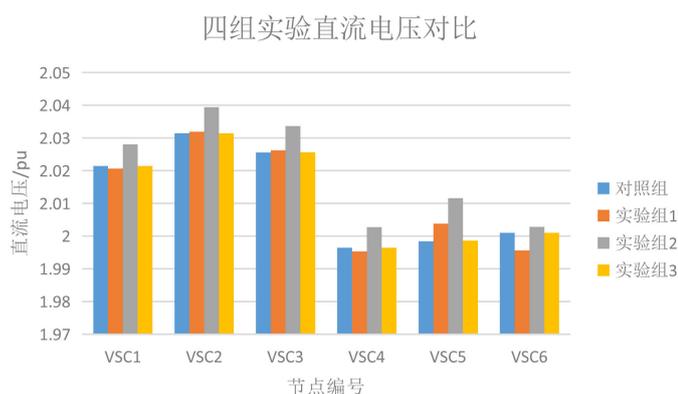


Figure 3. DC voltage comparison before and after optimization of scenes 1, 2 and 3

图 3. 场景 1、2、3 优化前后直流电压对比

对比对照组和实验组 1 数据可知, VSC5、VSC6 的参考功率优化后, 仅 VSC5、VSC6 对应节点电压波动较明显, 其余节点直流电压基本不变; 对比对照组和实验组 2 数据可知, VSC5、VSC6 的参考电压优化后, 所有节点的直流电压均发生不同程度的波动, 直流电网电压波动较大; 对比对照组和实验组 3 数据可知, VSC5、VSC6 的电压下垂系数优化前后所有节点直流电压基本不变。

从系统运行稳定性的角度分析, 调节电压下垂系数对直流电压的影响最小, 调节参考功率次之, 调节参考电压会使整个直流电网电压发生比较大的波动。

2) 系统网损优化效果对比

VSC 不同参数的网损优化效果如表 3 所示, 由图表数据可知, 优化 VSC5、VSC6 下垂控制参考功率或参考电压, 其输出功率发生显著变化, 系统网损也大大降低; 而对换流器电压下垂系数来说, 即使将其调至最优也不能使换流器输出功率发生明显变化, 系统网损优化效果不佳。

Table 3. Comparison of network loss optimization effects of different parameters of VSC

表 3. VSC 不同参数的网损优化效果对比

场景	实验组可控参数	对照组/pu				实验组/pu				实验组比对照组网损降低/MW
		VSC5 参数	VSC6 参数	VSC5 输出功率	VSC6 输出功率	VSC5 参数	VSC6 参数	VSC5 输出功率	VSC6 输出功率	
场景 1	参考功率	-1.0	-0.4	-0.9213	-0.4514	-0.08	-1.32	-0.2708	-1.1002	5.4288
场景 2	参考电压	2.0	2.0	-0.9213	-0.4514	2.021	1.984	-0.2313	-1.1395	6.0696
场景 3	下垂系数	50	50	-0.9213	-0.4514	70	70	-0.9049	-0.4679	0.2336

从系统运行经济性的角度分析, 优化电压下垂控制参考功率和参考电压比优化电压下垂系数的网损降低效果更好。

5. 结论

从系统运行可靠性的角度分析, 调节 VSC 电压下垂系数对直流电压的影响最小, 但同时由于电压下垂系数对 VSC 输出功率的调节能力有限, 调节 VSC 电压下垂系数并不能使系统网损明显减少。

从系统运行经济性的角度分析, 调节 VSC 参考电压的网损优化效果最好, 但同时调节参考电压会使整个直流网络电压发生较大的波动, 甚至可能造成系统失稳。

综合系统运行可靠性和经济性两方面的要求, 考虑将 VSC 下垂控制参考功率作为首选的优化参数。调节 VSC 参考功率能够在保证系统安全稳定运行的同时, 使系统网络损耗大大降低, 是一种有效的无功优化措施。

参考文献

- [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.
- [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.
- [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.
- [4] 赵成勇, 郭春义, 刘文静. 混合直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] 张众. 交流/直流联合电网稳态分析方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [6] 邱迪. 交流/混合直流联合系统最优潮流分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [7] 孙黎霞, 陈宇, 宋洪刚, 等. 适用于 VSC-MTDC 的改进直流电压下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1037-1043.
- [8] 李子寿, 周密, 徐箭, 等. 考虑交流电网调节能力的 VSC-MTDC 改进下垂控制方法[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 79-85.
- [9] 王渝红, 陈勇, 曾琦, 等. 适用于 VSC-MTDC 的改进下垂控制[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3190-3196.
- [10] 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]. 电力系统及其自动化, 2017, 41(22): 48-55.
- [11] Daelemans, G. (2008) VSC HVDC in Meshed Networks. Catholic University of Louvain, Belgium.
- [12] 李程昊, 谢竹君, 林卫星, 等. 中高频模块化多电平换流器阀损耗的精确计算方法与分析平台[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4361-4370.
- [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): 43-44.
- [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]. 电力系统及其自动化, 2008, 32(23): 41-45.
- [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.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org