

基于电压下降方式的 VSC - MTDC 控制方式研究

伍 欣, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电压源换相高压直流输电是基于电压源换流器(VSC)的新一代高压直流输电技术。首先对 VSC - HVDC 的内外环控制进行分析, 确定内外环控制方式, 然后对多端柔性直流输电(VSC - MTDC)的控制策略进行研究, 采用电压下降的控制方式对五端直流系统进行建模, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行仿真模拟。结果表明采用电压下降控制方式的 VSC - MTDC 具有良好的系统协调性, 具备利用上层控制可以快速自动调节功率分配的特性, 并且具有良好的扩容性。

关键词: 多端柔性直流; 电压下降控制; 内外环控制; PSCAD/EMTDC; 系统扩容

Abstract: VSC - HVDC transmission is a new generation of high - voltage DC transmission technology based on voltage source converter (VSC). The inner ring and outer ring control of VSC - HVDC is analyzed firstly to determine the inner and outer ring control method, and the control strategies of multiterminal VSC - HVDC transmission system (VSC - MTDC) are studied. The modeling of five - terminal DC system is carried out using the voltage - droppd control, and the simulation is done with PSCAD/EMTDC simulation software. The results show that VSC - MTDC has a good system compatibility under the voltage - droppd control, has the characteristics of adjusting power allocation fast and automatically using the upper control, and can expand its capacity easily.

Key words: multiterminal VSC - HVDC; voltage - dropped control; inner and outer ring control; PSCAD/EMTDC; capacity expansion

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)01 - 0001 - 04

0 引 言

随着分布式能源的广泛开发, 新型直流输电系统有着广泛的应用, 国际上许多的研究机构都在进行着相应的研发和建设, 其中包括 ABB 公司在瑞典(Hellsion)搭建的工业试验用 VSC - HVDC 系统以及后来的同样位于瑞典哥特兰(Gotland)岛上的世界第一条投入商业运行的 VSC - HVDC 系统等^[1-3]。

国内外现在关于电压源直流输电系统的研究已经较为深入, 技术也相当成熟, 但在 VSC - HVDC 基础上衍生出来的基于电压源变流器多端直流输电系统(VSC - MTDC)现在尚处于理论研究阶段, 世界上尚无任何已经投入运行的系统。目前国内外所有的多端直流输电系统都是电流源变流器多端系统, 它的直流侧可以等效成一个受控电压源, 因此需要精确的电压平衡才能并联运行。而电压源变流器的直

流侧可以等效成一个理想电流源, 因此可以搭建环形、辐射形、网形以及混合型并联直流网络, 因此对 VSC - MTDC 的研究, 有着非同寻常的意义^[4-6]。

VSC - MTDC 可以在风力发电、分布式发电、海上风电场、城市中心配电等场合应用, 在系统的灵活性和经济性上面与两端系统相比优势明显, 但与此相应, 在控制方式上也更加灵活多变, 更加困难。

1 内外环控制方式

1.1 内环电流控制器

电压源变流器由于采用的是正弦脉宽调制(SPWM), 所以变流器有延时为 $1/(1 + T_w s)$, 其中的 $T_w = 1/2f_s$, f_s 是变流器的开关频率^[7-10]。对于典型的电压源变流器来说, 其时间常数 $\tau = L/r$ 比 T_w 大很多, 因此在利用比例积分(PI)控制器进行闭环控制时, 可以用其零点来消除外电路的主导极点。如图 1 所示, 图中 i_d 和 i_q 分别是 d 轴和 q 轴电流控制器的参考电流, 是由外环控制器提供的, 内环电流控制

基金项目: 国家科技部“973”项目(2013CB22804); 国家电网公司科技项目资助

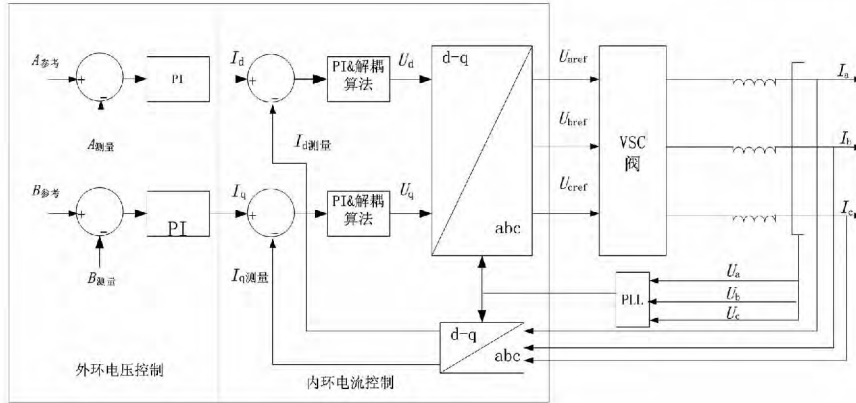


图 1 VSC 直接电流控制原理示意图

器输出的是 d 轴和 q 轴的参考电压 V_d 和 V_q 。经过帕克反变换后得到的就是 PWM 调制用的正弦参考电压 U_{aref} 、 U_{bref} 和 U_{cref} 。

1.2 外环电压控制器

外环控制器包括有功部分和无功部分,有功部分可以控制有功功率或者直流电压,无功部分可以控制无功功率或者交流电压。有功部分输出信号是 d 轴电流参考值,无功部分输出信号是 q 轴电流参考值。外环控制器一般同时包含有功控制和无功控制。这里采用的是直流电压控制和交流电压控制。

1.2.1 定直流电压控制

定直流电压变流站交直流功率必须平衡,所以有

$$P_{AC} + P_{DC} + P_{cap} = 0 \quad (1)$$

公式中的 P_{cap} 是电容上储存的有功功率,利用 dq 做好以下的变流器数学模型,可以得出

$$\frac{3}{2}V_s i_d + V_{DC} I_{DC} + V_{DC}(I_{dc} - I_{DC}) = 0 \quad (2)$$

其中 $I_{dc} - I_{DC} = I_{cap}$ 是变流器直流侧电容的电流。从公式(2)可以看出电容电流为

$$I_{cap} = -\left(\frac{3V_s i_d}{2V_{DC}} + I_{DC}\right) \quad (3)$$

根据电容电压得出的电容电流为

$$I_{cap} = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (4)$$

将公式(4)带入式(3)得到直流电压微分方程变为

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = -\frac{2}{C}\left(\frac{3V_s i_d}{2V_{DC}} + I_{DC}\right) \quad (5)$$

从公式(5)可以看出直流电压变化率与有功电流有关,故可以通过有功电流参考值 i_d^* 控制变流器的直流电压。利用直流电压信号作为补偿信号可以

明显地改善控制器的性能。定点压变流器的额定容量不是无限的而且直流电压控制器也无法限定变流器的有功功率,所以应该为直流电压控制器加装功率限制。

功率限制是通过有功电流和无功电流的最大值控制实现的,根据公式: $P_{DC} = P_{dq} = \frac{3}{2}V_{sd} i_d = \frac{3}{2}V_s i_d$ 在交流电压确定的条件下得到有功功率 P_{DC} 与有功电流 i_d 的关系,因此根据变流器的额定功率可以确定有功电流的最大值和最小值,而两者绝对值相等符号相反,且分别对应着变流器的最大整流功率与最大逆变功率。

该控制器是在定直流电压控制器的基础上改进而成,在定电压控制器输出端上添加了一个幅值限定器,其输出的 d 轴电流参考值的上限均是定功率控制器决定的,所以当变流器的整流功率为变流器额定功率时 P_{max} , d 轴电流参考信号无法继续升高,变流器的最大整流功率被限制为 P_{max} 。当变流器的逆变功率等于 P_{min} 时, d 轴电流参考信号无法继续降低,变流器的最大逆变功率被限制为 P_{min} , 且 $P_{min} = -P_{max}$ 。

1.2.2 交流电压控制

弱交流网络的线路电阻和电抗较大,如果改变有功功率,这会造成明显的电压波动。因此如果变流器连接的是弱交流网络,需要设定变流器维持交流电压恒定。

电力系统中有

$$\dot{V}_c - \dot{V}_s = (r + j\omega L) \dot{I} \quad (6)$$

其中, \dot{V}_c 为变流器交流侧电压向量; $r + j\omega L$ 是线路阻抗; \dot{I} 为交流电流向量。

$$\dot{i} = \left(\frac{s}{|\dot{V}|} \right)^* = \left(\frac{P+jQ}{V_c/\sqrt{2}} \right)^* = \left(\frac{P-jQ}{V_c/\sqrt{2}} \right) \quad (7)$$

将公式(7)带入公式(6)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= \dot{V}_s + (r+j\omega L) \dot{i} \\ &= \dot{V}_s + (r+j\omega L) \left(\frac{P-jQ}{V_c/\sqrt{2}} \right) \\ &= \dot{V}_s + \left(\frac{P+Q\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \right) + j \left(\frac{P\omega L-Qr}{V_c/\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

处于正交坐标轴上的有功和无功分量对合成电压幅值 V_c 的影响很小。因此,可以忽略正交轴上的分量,则 V_c 可以近似为

$$\dot{V}_c = \dot{V}_s + \left(\frac{P+Q\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \right) \quad (9)$$

在公式(9)中 P 是由所需有功功率决定的。因此通过无功补偿可以维持交流电压恒定 V_c 。当有功功率 P 不变时,其数学关系如下

$$\Delta V_c = \frac{\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \Delta Q = \frac{\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \Delta V_s i_q \quad (10)$$

交流电压控制器的结构如图 1 所示,其中 i_q 是内环无功电流控制器的参考输入信号。

2 电压下降控制方式

采用电压下降控制方式的多端系统,其换流器的直流输出端电压随输出电流或者功率的不同而线性变化,为了保证系统的稳定运行,一般采用下降输出的特性,即输出直流电压随输出有功功率或者直流电流的增加而下降,下降的 $P-V$ 或 $I-V$ 特性使得系统功率可以在各个换流器间稳定地分配,各换流器 $P-V$ 或 $I-V$ 曲线的下降决定了系统功率分配特性的优劣。

图 2 中所有变流器都采用的是直流电压下降控制器,但是每个变流器的直流电压设定值都不同,由于变流器间是并联的,忽略线路直流电压下降,则变流器的直流电压相等。因为每个变流器的特性不同,所以虽然直流电压相同但直流功率不同,当功率平衡时,直流网络电压稳定。

图 2 中第一行是应用电压下降策略正常运行的一个三端系统。当变流器 2 和 3 降低电压设定值时,如第二行所示,则 P_2 和 P_3 增大,由于变流器 2 和 3 是逆变站,所以功率不平衡,即

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 < 0 \quad (11)$$

由于直流功率小于零,直流电容放电,所以直流电压降低。根据变流器 1 的特性可知,电压下降时它会增大输入到直流网络的功率使其在新的电压下恢复平衡。类似的是当变流器 1 升高电压设定值如图 2 中第三行所示时,由于变流器 1 是整流变流器,故功率不平衡为

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 > 0 \quad (12)$$

此时直流电容充电,所以直流电压升高,导致变流器 2 和 3 的吸收功率增加,进而重新恢复平衡。

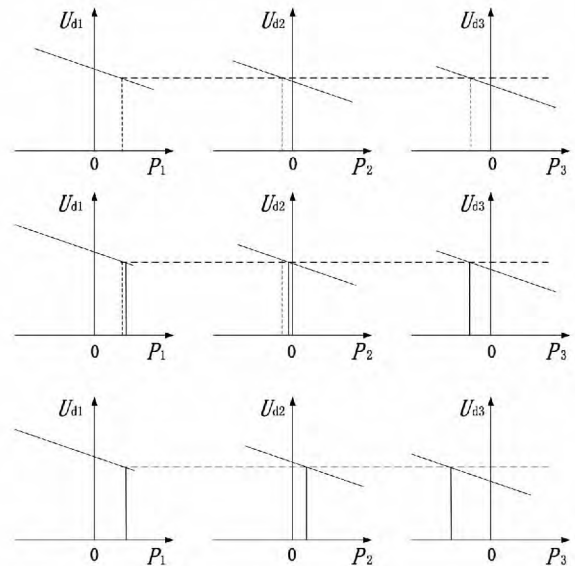


图 2 采用电压下降控制方式的多端系统控制特性

如果下降斜率较陡,那么功率分配特性较好,且不易发生功率振荡,但是同时由于直流电压下降较多,导致电压质量较差,而且直流电压偏离额定值过多时也会使得系统无法保持稳定运行;相反,如果曲线下下降斜率比较平缓,那么电压质量较好,但是较小的斜率又使得系统的功率分配性能较差。因此采用电压下降控制方式,最关键的就是要选择合适下降斜率,从而平衡电压质量和功率分配特性,确保系统的正常稳定运行。

采用电压下降控制的多端系统具有良好的扩充性与运行的灵活性,但是随着系统规模的扩大,直流系统的静态稳定性会降低,因此不适合大规模的系统采用。

理论上,采用带电压下降特性控制方法的多端系统不需要上层控制进行定值协调,即可稳定运行。但是,由于采用该方法的多端系统仍然需要进行潮流调整,因此上层控制器仍然是必须的,所以可以只保留其中的潮流整定模块,而忽略掉电流整定值协

调模块。采用这种方式运行时,各个换流站的控制具有一定的稳定裕度,并且不需要高速通讯的支持;同时,各个换流器在上层控制器的协调下,不断校正参考值。

3 仿真分析

采用 PSCAD/EMTDC 软件建立五端直流系统,如图 3 所示,VSC1、VSC2 为逆变侧,VSC3、VSC4、VSC5 为整流侧。

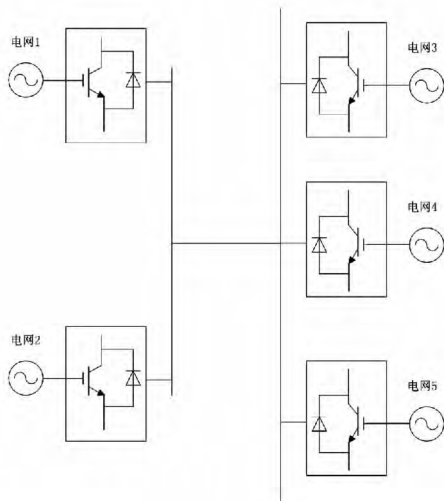
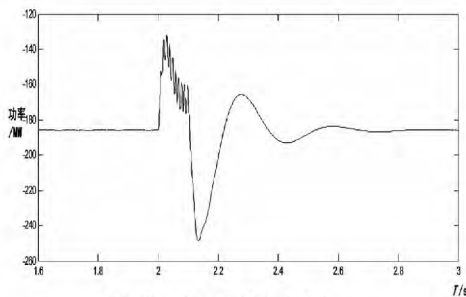
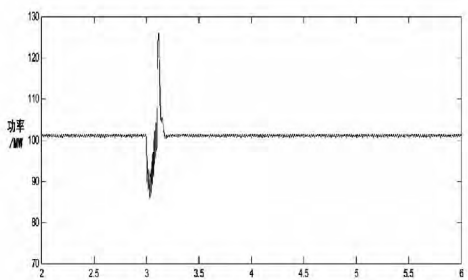


图 3 五端直流输电系统并联结构示意图



(a) 注入电网 1 的有功功率



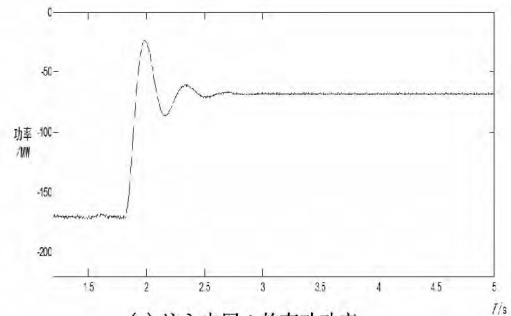
(b) 注入电网 3 的有功功率

图 4 单点-单相故障情况下的仿真分析

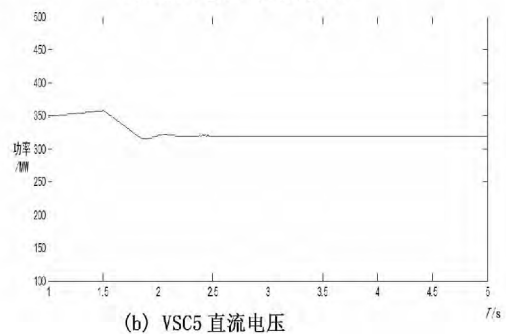
算例 1: 在 $T = 2\text{ s}$ 时 VSC1 交流侧发生单相接地故障,持续时间为 0.1 s ; 在 $T = 3\text{ s}$ 时 VSC3 交流侧发生接地故障,持续时间为 0.1 s ,由图 4 可见,不

管是整流侧还是逆变侧发生接地故障时均可以快速恢复稳定。

算例 2: VSC5 在 $T = 1.5\text{ s}$ 时发生短路故障,由图 5 可见,逆变侧 VSC1 功率下降,直流电压下降,有效地阻止了系统不稳定的发生。



(a) 注入电网 1 的有功功率



(b) VSC5 直流电压

图 5 VSC5 侧短路故障情况下的仿真分析

4 结论

由以上仿真分析可以看出,采用电压下降控制方式的 VSC-MTDC 系统具有使用上层控制可以直接快速调节潮流分配,对于 $N-1$ 系统而言,可以保持系统的稳定性,在失去 1 个电网或 1 台机组的情况下仍然可以保证其他电网的稳定运行,这个在分布式能源的开发利用中有很大的优势,因为,例如风电、太阳能发电等均具有随一些不确定因素变化的特点,而应用电压下降控制方式可以尽可能地忽略掉这些不稳定因素,而且采用电压下降控制方式的 VSC-MTDC 具有良好的扩容性,可以在原系统上继续添加柔性直流系统。

参考文献

- [1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 2010.
- [2] 陈海荣, 徐政. 适用于 VSC-MTDC 的直流电压控制策略 [J]. 电网技术 2006 30(19): 28-33.

(下转第 9 页)

方法在处理非平稳信号时具有很大优势,较适合对实际大电网的实测信号的分析。

表 3 去噪后分析结果与未去噪分析结果及理论值比较

模式	频率/Hz			阻尼比/%		
	去噪前	去噪后	理论值	去噪前	去噪后	理论值
1	0.401 2	0.384 5	0.379 7	2.21	1.52	1.60
2	0.537 6	0.511 3	0.521 3	4.21	2.29	2.44
3	0.620 9	0.648 5	0.657 5	3.66	4.17	4.06

4 结 论

提出了一种利用小波去噪技术对振荡数据进行预处理,然后运用随机子空间方法对数据进行分析的新方法,用于电力系统低频振荡信号特征的提取,特别是对非平稳信号的处理具有有效性和准确性。而且随机子空间方法具有参数少、抗噪能力较强、分辨率较高、拟合效果较好等优点,满足低频振荡辨识和系统振荡分析的需要。小波预处理技术在提高精确度的同时,也降低了分析速度。

参考文献

[1] Klein M ,Rogers G J ,Kunder P. A Fundamental Study of Inter - area oscillations in Power Systems [J]. Power Systems ,1991 ,6(3) : 914 - 921.

[2] Task Force of Advisory Group 01 of Study Committee 38. GIGRE Technical Brochure on Analysis and Control on Power System Oscillation [R]. Paris: GIGRE Special Publication ,1996.

[3] 鞠平 谢欢 孟远景 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡 [J]. 中国电机工程学报 2005 22(10) : 59 - 63.

[4] 竺炜 唐颖杰 周有庆 等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别 [J]. 电网技术 2009 33(5) :

44 - 47.

[5] Wies R W ,Pierre J W ,Trudnowski D J. Use of ARMA Block Processing for Estimating Stationary Low - frequency Electromechanical Modes of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems. 2003 18(1) : 167 - 173.

[6] 韩松 何利铨 孙斌 等. 基于希尔伯特 - 黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用 [J]. 电网技术 2008 32(4) : 56 - 60.

[7] Ghasemi H ,Canizares C ,Moshref A. Oscillatory Stability Limit Prediction Using Stochastic Subspace Identification [J]. IEEE Trans. on Power Systems 2006 21(2) : 736 - 745.

[8] 陈卓. 工况模态分析在低频振荡辨识中的应用初探 [J]. 电力系统保护与控制 2009 37(8) : 34 - 37.

[9] Mallat S ,Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory ,1992 38(2) : 617 - 643.

[10] D. L. Donoho. De - noising by Soft - thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory , 1995 , 41(3) : 613 - 627.

[11] Santoso S , Powers E J , Grady W M. Power Quality Disturbance Data Compression Using Wavelet Transform Methods [J]. IEEE Trans on Power Delivery , 1997 ,12(3) : 1250 - 1257.

[12] Carl T. The What , How , and Why of Wavelet Shrinkage Denoising [J]. Computing in Science & Engineering , 2000 ,2(3) : 12 - 19.

[13] Hilton L , Ogdan T. Data Analytic Wavelet Threshold Selection in 2 - D Signal Denoising [J]. IEEE Trans on Signal Processing ,1997 45(2) : 496 - 500.

[14] Van Overschee Peter ,De Moor Bart. Subspace Algorithms for the Stochastic Identification Problem [C] // The IEEE Conference on Decision and Control ,Brighton ,England: 1991. (收稿日期: 2013 - 08 - 26)

(上接第 4 页)

[3] Lie Xu ,Liangzhou Yao ,Christian Sasse. Grid Integration of large DFIG - Based Wind farms Using VSC Transmission [J]. IEEE Transactions on Power Delivery , 2010 , 25(3) : 1952 - 1961.

[4] Dorn J ,Huang H ,Retzmann D. Noel Voltage Source Converters for HVDC and FACTS Applications [C]. Conf. CIGER Symposium ,Osaka ,Japan ,2007.

[5] 姚为正 邓祥纯 易映萍 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制 2009 ,37(22) : 71 - 75.

[6] Bin Lu ,Boon - Teck Ooi. Nonlinear Control of Voltage - source Converter System [J]. IEEE Transaction on Power Electronics ,2007 ,22(4) : 1186 - 1195.

[7] 张文亮 汤涌 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景 [J]. 电网技术 ,2010 ,34(9) : 1 - 6.

[8] Beerten ,J. ,Van Hertem ,D. ,Belmans ,R. VSC MTDC System with a Distributed DC Voltage Control - A Power Flow Approach [C]. PowerTech , 2011 IEEE Trondheim: 1 - 6.

[9] 梁盟. 柔性多端直流输电的控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[10] TANG ,Lian - xiang ,Ooi B T. Protection of VSC - Multi - Terminal HVDC against DC Faults [C]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference. 2002: 719 - 724.

作者简介:

伍欣(1986),硕士研究生,主要研究方向为高压柔性直流输电;

李兴源(1945),教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(收稿日期: 2013 - 11 - 19)