

柔性直流输电系统技术优势及仿真研究

柔性直流输电技术具有功率调节灵活、低次谐波含量少、可向无源网络供电、为系统提供动态无功补偿以及故障抗扰动性能好等优点,受到世界范围内的广泛关注,在大容量清洁能源并网、大区域电网互联等领域具有广阔的应用空间。总结了柔性直流输电技术的应用现状与技术优势,研究了基于同步旋转坐标变换的柔性直流系统直接电流控制方法,搭建了仿真模型,仿真结果表明直接电流控制方法能够实现换流器间有功、无功功率的独立控制及功率的四象限流动,具有良好的控制性能。

王存平/国网北京市电力公司电力科学研究院

0 引言

随着电力电子技术及控制技术的快速发展,柔性直流作为新一代直流输电技术,与传统交直流技术相比具有诸多技术优势,为未来电网提供了新的发展方向^[1-3]。

柔性直流输电技术最早于1990年由加拿大学者提出,基于电压源型换流器技术,通过控制全控型电力电子器件的开通和关断,实现对交流侧有功、无功功率的独立控制。CIGRE及IEEE于2004年将其正式命名为“电压源变流器直流输电(VSC-HVDC)”;ABB和Siemens公司习惯称其为“HVDC Light”及“HVDC Plus”。2006年5月,国网公司科技部和电科院组织权威专家论证,建议国内将该技术统一命名为“柔性直流输电”,对应英文为“HVDC Flexible”^[4-5]。

柔性直流输电换流器结构经历了从两电平、三电平到模块化多电平拓扑的发展过程。模块化多电平(MMC)技术的应用,大幅度提高了柔性直流输电的电压等级与容量,并且降低了谐波含

量,减小了器件开关损耗。

本文总结了柔性直流输电技术的应用现状、技术优势和基本控制策略,并搭建了仿真模型,同时对柔性直流输电系统控制策略进行了验证。

1 应用现状

柔性直流输电技术可广泛应用于分布式可再生能源并网、电网互联、城市及海岛供电等领域^[6-8]。自1997年ABB公司在瑞典Hellsjon首次进行了柔性直流输电系统工程试验以来,目前世界范围内已有近20个工程投入运行;1999年瑞典投运的哥特兰工程是世界第一个风电场接入电网柔性直流工程;2002年美国投运的Cross Sound Cable工程实现了地区电网互联;2005年挪威投运的泰瑞尔工程首次通过柔性直流输电系统实现了大陆向海上平台供电;2010年投运的Trans Bay Cable工程是世界上第一个使用MMC技术的柔性直流输电工程。

近十年来,我国在柔性直流输电工程技术研究方面取得了一系列自主创新成果。2011年投运的上海南汇柔性直流输电示范工程,实现了南汇风电场的接入,大幅度提高了风电场的低电压穿越能力,这也是亚洲首个具有自主知识产权的柔性直流输电工程。2012年在大连建设的连接北部主网和市区南部港东地区的柔性直流输电工程,成功研制出世界首套1 000 MW/±320 kV换流阀及阀基控制器,标志着中国在柔性直流输电换流阀领域已经达到世界最高水平。2013年12月,在广东南澳风电场基地投运的三端柔性直流输电工程,标志着世界首个多端柔性直流输电工程建成^[9]。2014年



王存平/工程师

关键词/Keywords

柔性直流输电·
电压源换流器·
直接电流控制·
建模仿真·

7月4日，世界首个五端柔性直流输电工程——浙江舟山±200 kV五端柔性直流工程正式投运，该工程是目前世界上已投运的端数最多、电压等级最高以及单端容量最大的多端柔性直流工程，具

有完全自主知识产权，标志着我国站上了世界柔性直流输电领域的制高点^[10]。

目前投运的部分柔性直流输电工程情况如下表所示。

表 目前投运的部分柔性直流输电工程

工程名称	投运时间	用途	容量 / MW	直流电压 / kV	线路长度 / km	国家
Gotland	1999	风电场并网	54	± 80	70	瑞典
Directlink	2000	城市供电	3 × 60	± 80	65	澳大利亚
Eagle Pass	2000	城市供电	36	± 1.9	背靠背	美国
Tjaereborg	2000	风电场并网	8	± 9	2 × 4.3	丹麦
Cross Sound Cable	2002	城市供电	330	± 150	40	美国
Murraylink	2002	城市供电	220	± 150	180	澳大利亚
Troll A	2005	孤岛供电	2 × 42	± 60	4 × 70	挪威
Estlink	2006	电网互联	350	± 150	2 × 31+2 × 74	欧洲国际互联
Caprivi Link	2009	电网互联	300	± 350	970	非洲国际互联
Interconnector						
NordE.ON.1	2009	风电场并网	400	± 150	2 × 75 + 2 × 128	德国
上海南汇工程	2011	风电场并网	18	± 30	8	中国
大连柔性直流输电工程	2012	城市供电	1000	± 320	60	中国
广东南澳柔性直流输电工程	2013	多端风电场并网	200	± 160	40.7	中国
舟山五端柔性直流输电工程	2014	孤岛供电 风电场并网	1000	± 200	141.5	中国

2 技术优势

柔性直流输电技术以全控型可关断器件和脉宽调控（PWM）技术为基础，能够快速独立调节系统的有功和无功功率。与传统HVDC相比，柔性直流输电具有诸多优势：

- 1) 可以实现无源逆变，能向无源系统供电，在潮流反转时，直流电流方向反转，而直流电压极性不变。
- 2) VSC换流器产生的低次谐波较少，只需在交流母线上安装一组高通滤波器，使滤波装置的容量大大减小。
- 3) 既能输送有功功率，又能动态补偿无功功率，稳定交流母线电压。
- 4) 在连接两个独立交流系统的柔性直流输电系统中，当一侧交流系统发生故障或扰动时，通过适当的控制策略，并不会影响到另一侧交流系统和换流器。控制难点是如何抑制暂态过程中出现的过电流和过电压问题。
- 5) 能提高系统阻尼，其本身不仅会引发发电机组的次同步振荡，还会提高发电机组的次同步振荡阻尼^[11]。

6) 柔性直流输电系统可以用于电网“黑启动”，能直接控制输出电压，快速控制频率，保证发电机完全进入稳定状态。柔性直流输电系统能够逐步激发变压器等设备，不会产生过大的励磁电流。

7) 换流器之间无须通信，便于构成并联的多端直流输电系统。

8) 模块化设计使柔性直流输电系统的设计、生产、安装和调试周期大为缩短，占地面积也大大减小。

3 基本结构与控制策略

柔性直流输电系统主要由电压源换流器（VSC）、直流电容器、输电线路、换流电抗器和交流滤波器等元件构成。其中，VSC是柔性直流输电系统的主体部件；直流电容器是直流储能元件，起到缓冲桥臂开断冲击电流、减小直流电压谐波和为换流站提供电压支撑的作用；换流电抗器是VSC与交流系统之间能量交换的纽带，同时起滤除交流侧谐波和抑制短路电流的作用；交流滤波器用于滤除交流电压中的高次谐波。

两端柔性直流输电系统是最简单的柔性直流

输电系统,系统结构如图1所示。有功功率从一个换流站传输到另一个换流站,并可以实现潮流反

转;无功功率由两端换流站自己产生,直流线路不传输无功功率。

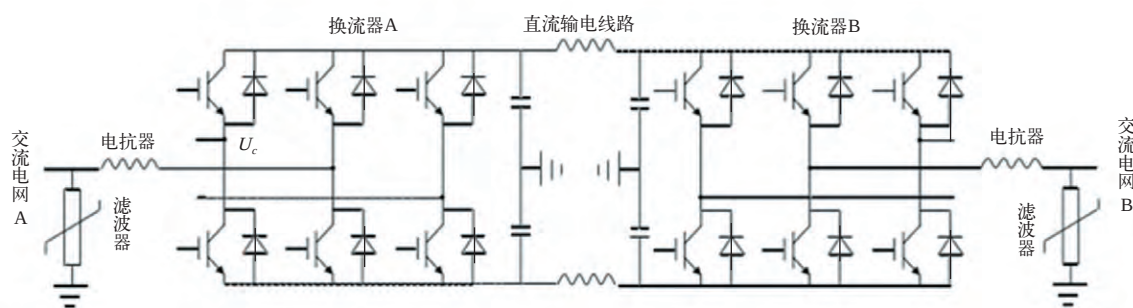


图1 两端柔性直流输电系统结构示意图

对于柔性直流输电系统而言,所有换流器注入直流电网的有功功率之和或电流之和接近为零时才能保证系统稳定运行。换流器可采用定直流电压控制、定有功功率控制、定无功功率控制以及定交流电压控制等模式。在两端柔性直流输电系统中,一端必须采用定直流电压控制模式;另一端控制模式根据不同应用场合确定。如果向无源系统供电,则与无源交流系统相连的换流器

应采用定交流电压控制模式。

柔性直流输电换流器的控制方法主要有两类:一是基于电压幅值和相位控制的间接电流控制方法;二是基于同步旋转坐标变换的直接电流控制方法^[12-14]。直接电流控制方法可以更好地实现有功、无功的解耦控制,并具有更快的响应速度与更高的控制准确度。直接电流控制方法包括电流内环、电压外环以及有功、无功控制,控制原理如图2所示。

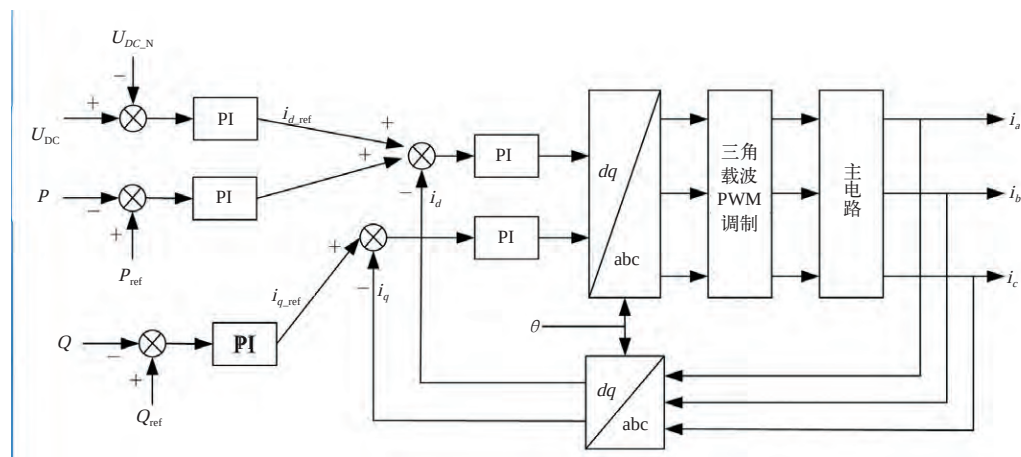


图2 基于同步旋转坐标系的柔性直流输电VSC控制原理示意图

4 仿真分析

用Matlab/Simulink仿真软件建立两端柔性直流输电系统的仿真模型,柔性直流输电系统连接两端10 kV交流电网,连接一端交流电网的VSC(记为“换流器A”)采用直流电压控制与无功功率控制模式;连接另一端交流电网的VSC(记为“换流器B”)采用有功功率控制与无功功率

控制模式。

仿真模型中,直流母线电压设定值为16 kV,换流器A、B所接交流系统的无功功率分别为1 000 kvar、700 kvar,换流器B的有功功率指令值设置如下:初始有功交换为0,0.2 s起吸收功率200 kW,0.3 s起发出功率50 kW,0.4 s起发出功率300 kW。仿真波形如图3~图5所示。

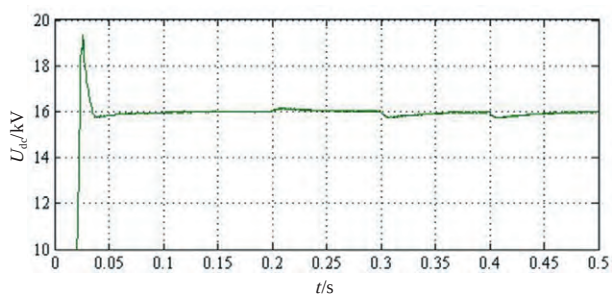


图3 直流母线电压波形

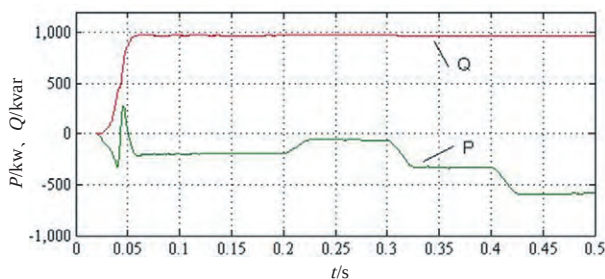


图4 换流器A输出有功、无功功率波形

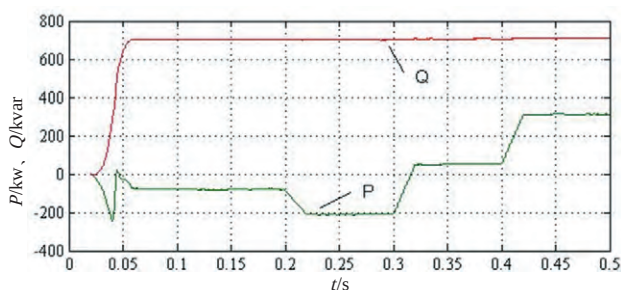


图5 换流器B输出有功、无功功率波形

可见,所设计的基于同步旋转坐标变换的直接电流控制方法可以很好地实现换流站间功率的独立控制及功率流的四象限运行,并具有较高的控制准确度与快速的响应速度。

5 结束语

建设更加智能、可靠、清洁和高效的输配电网络已经成为世界各国电力行业发展的共同目标。柔性直流输电技术以其功率调节灵活、无源供电能力强以及阻尼系统振荡等优势,越来越受到人们的关注。基于同步旋转坐标变换的柔性直流系统控制方法能够实现换流站间有功、无功功率的独立控制及功率流的四象限运行,并具有控制准确度高与响应速度快等特点。同时,随着电力电子技术、控制技术及相关设备技术水平的不断进步,高电压大容量的柔性直流技术将更趋完善,必将在大容量清洁能源接入电网、大区域电

网互联等电网建设重要环节中发挥关键作用。

参考文献

- [1] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 刘振亚. 智能电网承载第三次工业革命[J]. 国家电网, 2014 (1): 30-35.
- [3] 黄川. 海上风电场VSC-HVDC柔性直流输电变流器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [4] 刘隽,何维国,包海龙. 柔性直流输电技术及其应用前景研究[J]. 供用电, 2008, 25(1): 6-9.
- [5] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高压技术, 2007, 33(1): 1-10.
- [6] 张林山,杨晴,崔玉峰,等. 柔性直流输电在城市电网中的应用[J]. 云南电力技术, 2010(38): 31-34.
- [7] 徐忻,胡靖,石辉,等. 基于电压源换流器的高压直流输电技术研究综述[J]. 广东电力, 2012, 25(5): 6-10.
- [8] 殷晓刚,戴冬云,韩云,等. 交直流混合微网关键技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 43-46.
- [9] 王旭辉. 南网建成世界首个多端柔性直流输电工程—我国柔性直流输电技术世界领先[N]. 中国能源报, 2014(20).
- [10] 王旭辉. 世界首个五端柔性直流工程投运—我国柔性直流输电技术领先世界[N]. 中国能源报, 2014(25).
- [11] 梁海峰. 柔性直流输电系统控制策略研究及其实验系统的实现[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [12] 唐庚,徐政,刘昇,等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.
- [13] 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): 71-76.
- [14] 邱大强. 柔性直流输电系统控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

(收稿日期: 2015-05-26) EA

作者简介

王存平(1986-),男,工程师,国网北京市电力公司电力科学研究院。