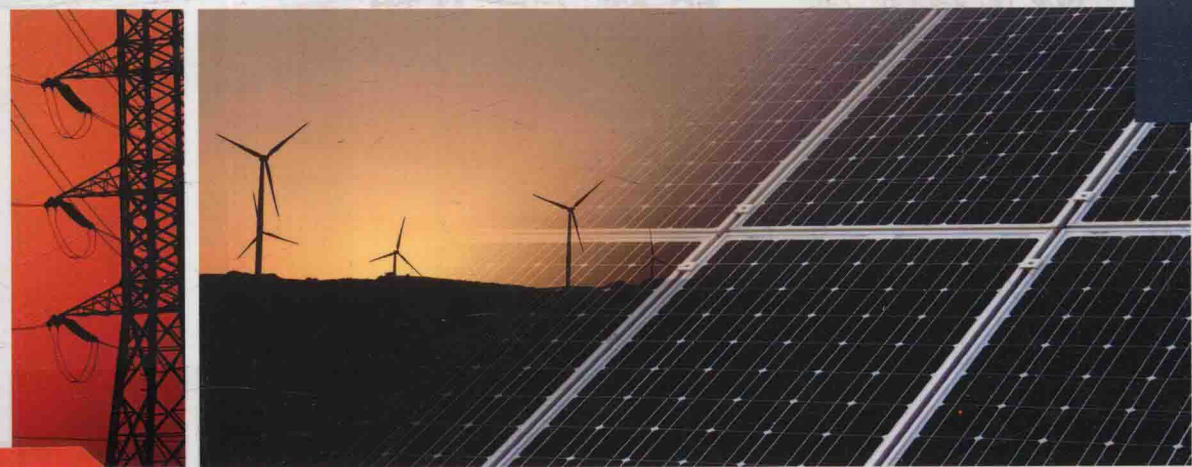


电网与清洁能源关键技术丛书

# 基于功率传递的电网间 同期并列原理与技术

刘家军 著



科学出版社

电网与清洁能源关键技术丛书

# 基于功率传递的电网间同期并列 原理与技术

刘家军 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书根据电压源换流器可以同时独立地对有功功率和无功功率进行控制的特点,首先提出将背靠背电压源换流器型高压直流输电应用于交流电网同期并列的新方法,研究装置并网的运行机理、保护配置及控制策略,以及在完成并网操作退出后,转换为统一潮流控制器、静止同步补偿器、静止同步串联补偿器的原理与电路实现方法;实现电网间同期并列与联络线输送功率的联合控制策略。其次根据统一潮流控制器和静止同步串联补偿器的特点,实现线路融冰。最后介绍研制的复合系统的实验装置及其管理系统。

本书可供高等院校电气工程及其自动化专业的师生使用,也可作为电力系统行业相关技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于功率传递的电网间同期并列原理与技术 / 刘家军著. —北京: 科学出版社, 2018.6

(电网与清洁能源关键技术丛书)

ISBN 978-7-03-055322-5

I. ①基… II. ①刘… III. ①电源-研究 IV. ①TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 281180 号

责任编辑: 祝 洁 杨 丹 王 苏 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 13

字数: 262 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## “电网与清洁能源关键技术丛书”编委会

主 任：贾 嵘

委 员：（以姓氏笔画排序）

王德意 刘家军 杨晓萍

张江滨 南海鹏 姚李孝

郭鹏程

## 前 言

全球大停电事故时有发生,事故后电力恢复并网操作必不可少,研究新的并网方式意义重大,也迫在眉睫。电网并列包括异步并列和同步并列。异步并列可通过高压直流输电技术实现,频率不同或电压等级不同的电网间异步并列如我国灵宝背靠背直流输电工程,实现了西北-华中电网的互联。同步并列操作难度较大且没有可以实现功率自动调节的并网装置,因此联络线的功率控制及并网的自动化技术研究势在必行,以满足智能电网自愈和可靠控制的要求。

发展大型互联电网已经成为当今世界各国现代电力系统发展的主体趋势和方向。电网互联具有诸多好处,同时带来了一系列的问题和挑战,如互联电网的协调组织问题、系统规划与资源优化问题、大系统的动态行为与安全性分析问题、运行与管理问题、改善稳定性以提高传输容量问题等。随着工业规模的不断发展和电网技术的不断进步与成熟,我国电网结构也正朝着电网互联的方向发展,而实现电网系统安全快速并网和互联电网稳定运行是电网互联首先要解决的问题和互联电网成功发展的必要条件。

因此,本书以背靠背 VSC-HVDC 装置为研究对象,以 PSCAD/EMTDC 为研究工具,对并网及其主要的拓展功能进行研究和仿真,主要取得了以下研究成果。

(1) 根据电网有功功率与频率、无功功率与电压的关系,提出一种基于背靠背电压源换流器型高压直流输电装置、通过功率传递实现电网间同期并列的新方法。

(2) 分析背靠背 VSC-HVDC 的各种数学模型及控制策略,研究背靠背 VSC-HVDC 装置用于同期并网的原理电路,并对并网方式和并网控制策略进行仿真,同时分析交流系统电压不平衡或发生不对称故障时的控制策略。

(3) 研究背靠背 VSC-HVDC 装置在并网过程中,因传递功率在联络线上引起功率波动的机理与波动峰值的计算方法。该研究有助于掌握并网过程中联络线功率波动的动态特性,对提高并网装置的安全性和并网操作的可靠性具有指导意义。同时根据并网系统的特点,对其进行保护配置。

(4) 研究将背靠背 VSC-HVDC 并网装置拓展为一个复合系统,并在并网完成后实现统一潮流控制器、静止同步补偿器及静止同步串联补偿器功能转换的电路及实现方法,提高电力系统运行稳定性与控制的灵活性。

(5) 提出一种基于功率传递方式实现电力系统并网与统一潮流控制器功能相

结合的控制策略,以期达到改变控制策略,实现同一装置完成多种功能的效果,并且拓展装置功能,提高并网设备的利用率。

(6) 提出一种基于电网间同期并列原理对覆冰线路进行融冰的方法,建立融冰的数学模型,通过 PSCAD/EMTDC 进行仿真,验证在进行了一定的功率传输后覆冰线路上的负载电流能够达到融冰效果。

(7) 提出并网装置容量的系统设计和计算方法,以及各参数的选取原则和计算方法,研究待并电网容量与并网装置配置容量的关系,为实际工程运用、设计及经济分析提供依据。

(8) 在基于功率传递原理的电网同期并列研究成果的基础上,研制基于 VSC-HVDC 的同期并网复合系统的实验装置样机,在 CCS 编程环境中实现脉冲触发信号的发生以及电压电流信号的采集等编程工作,最终在实验装置样机上进行调试,验证复合实验装置的功能。

本书的学术性和理论性较强。作者通过几年的深入研究,在搜集和阅读大量文献的基础上,结合现代电力系统发展的要求与趋势撰写本书,内容由浅入深,图文并茂,将理论与仿真实验相结合,充分验证了基于功率传递的电网间同期并列新方法的可行性。

本书是在作者及指导的研究生研究成果的基础上完成的,其中吴添森、刘小勇、闫泊、刘栋、刘博、田东蒙、贺瀚青、姚冯信、刘昌博、顾翾、王小康等研究生参与了本书相关内容的研究工作,西安理工大学水利水电学院的姚李孝教授和安源副教授,以及中国电力科学研究院的汤涌总工程师和孙华东高级工程师也参与了本书部分内容的研究。研究生杨松对书稿内容进行了整理,在此表示感谢。特别感谢贺长宏高级工程师对本书研究内容提出的宝贵意见,以及西安理工大学水利水电学院电力系老师的指正和帮助。本书得到了国家自然科学基金项目“基于功率传递电网间同期并列理论与应用研究”(51077109)的支持,同时得到了南京盾捷电气科技有限公司的支持与资助,在此表示衷心的感谢。

由于作者的知识和经验水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 前言

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                       | 1  |
| 1.1 电网间同期并列研究现状 .....                | 1  |
| 1.2 VSC-HVDC 的发展和应用现状 .....          | 3  |
| 1.3 VSC-HVDC 的控制策略研究现状 .....         | 5  |
| 参考文献 .....                           | 6  |
| 第 2 章 基于功率传递的电网间同期并列原理 .....         | 8  |
| 2.1 电网调频与调压 .....                    | 8  |
| 2.1.1 电网间同期并列的条件 .....               | 8  |
| 2.1.2 调频原理 .....                     | 9  |
| 2.1.3 调压原理 .....                     | 9  |
| 2.1.4 相角差控制原理 .....                  | 10 |
| 2.2 基于背靠背 VSC-HVDC 同期并列原理 .....      | 11 |
| 2.2.1 VSC-HVDC 的特性 .....             | 11 |
| 2.2.2 背靠背 VSC-HVDC 用于同期并网 .....      | 11 |
| 2.2.3 背靠背 VSC-HVDC 用于并网的工作原理 .....   | 13 |
| 2.3 并网装置的传递功率计算 .....                | 15 |
| 2.3.1 传递功率的流向控制 .....                | 15 |
| 2.3.2 并网装置功率传递值计算 .....              | 19 |
| 参考文献 .....                           | 20 |
| 第 3 章 基于背靠背 VSC-HVDC 并网系统的控制策略 ..... | 21 |
| 3.1 并网系统的模型分析 .....                  | 21 |
| 3.1.1 三相电压平衡时的并网模型 .....             | 21 |
| 3.1.2 三相电压不平衡时的并网模型 .....            | 25 |
| 3.2 并网系统的控制策略 .....                  | 27 |
| 3.2.1 换流器的启动 .....                   | 28 |
| 3.2.2 所需功率计算 .....                   | 29 |

|              |                        |           |
|--------------|------------------------|-----------|
| 3.2.3        | 两侧换流器的控制策略             | 29        |
| 3.2.4        | 并列点断路器合闸控制             | 30        |
| 3.3          | 双闭环控制策略                | 30        |
| 3.3.1        | 内环电流控制器                | 31        |
| 3.3.2        | 外环功率控制器                | 33        |
| 3.4          | 基于背靠背 VSC-HVDC 并网的仿真验证 | 38        |
| 3.4.1        | 差频并网仿真                 | 38        |
| 3.4.2        | 同频环网并列仿真               | 41        |
|              | 参考文献                   | 42        |
| <b>第 4 章</b> | <b>并网换流器的不平衡控制策略</b>   | <b>43</b> |
| 4.1          | 对称分量的实时检测              | 43        |
| 4.2          | 交流电压不平衡时的控制策略          | 46        |
| 4.2.1        | 正负序双回路双闭环不平衡控制策略       | 47        |
| 4.2.2        | 基于负序电压补偿的不平衡控制策略       | 48        |
| 4.3          | 仿真验证                   | 50        |
|              | 参考文献                   | 54        |
| <b>第 5 章</b> | <b>并网系统的联络线功率波动</b>    | <b>55</b> |
| 5.1          | 并网过程中联络线的功率波动          | 55        |
| 5.1.1        | 功率传递时联络线的功率波动          | 56        |
| 5.1.2        | 并网合闸瞬间联络线的功率波动         | 57        |
| 5.2          | 联络线功率波动的仿真分析           | 58        |
|              | 参考文献                   | 62        |
| <b>第 6 章</b> | <b>并网系统的保护配置</b>       | <b>64</b> |
| 6.1          | 故障时并网系统的运行特性           | 65        |
| 6.1.1        | 谐波传递特性分析               | 65        |
| 6.1.2        | 谐波传递特性仿真分析             | 67        |
| 6.2          | 并网系统保护配置的特点            | 76        |
| 6.2.1        | 并网装置的特点                | 76        |
| 6.2.2        | 并网系统的保护配置              | 76        |
| 6.2.3        | 保护配置仿真分析               | 80        |
| 6.3          | 并网系统的保护策略              | 83        |
| 6.3.1        | 并网系统保护策略的设计原则          | 84        |



|                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.2 并网保护动作的执行方式 .....                                       | 84         |
| 参考文献 .....                                                    | 85         |
| <b>第 7 章 并网装置实现复合功能转换电路及控制策略 .....</b>                        | <b>86</b>  |
| 7.1 并网装置实现复合功能的转换电路 .....                                     | 86         |
| 7.2 复合系统的控制策略 .....                                           | 89         |
| 7.3 并网装置转换为 STATCOM 的控制策略及仿真 .....                            | 95         |
| 7.3.1 STATCOM 装置的控制策略 .....                                   | 95         |
| 7.3.2 STATCOM 的多目标控制 .....                                    | 96         |
| 7.3.3 STATCOM 逆系统 PI 控制 .....                                 | 100        |
| 7.3.4 STATCOM 装置功能仿真验证 .....                                  | 109        |
| 7.4 并网装置转换为 SSSC 的控制策略及仿真 .....                               | 111        |
| 7.4.1 SSSC 调节联络线传输功率的能力 .....                                 | 111        |
| 7.4.2 并网后转换为 SSSC 装置的控制策略 .....                               | 114        |
| 7.4.3 基于背靠背 VSC-HVDC 的同期并网系统转为 SSSC 的仿真 .....                 | 115        |
| 参考文献 .....                                                    | 119        |
| <b>第 8 章 基于背靠背 VSC-HVDC 电网间同期并列装置实现 UPFC 的<br/>控制策略 .....</b> | <b>120</b> |
| 8.1 并网装置转换为 UPFC 后的潮流控制分析 .....                               | 120        |
| 8.1.1 UPFC 的电路拓扑结构 .....                                      | 120        |
| 8.1.2 系统各支路电压、电流关系 .....                                      | 121        |
| 8.1.3 UPFC 系统内部功率流动分析 .....                                   | 122        |
| 8.2 仿真分析 .....                                                | 125        |
| 参考文献 .....                                                    | 132        |
| <b>第 9 章 基于功率传递的并网装置在输电线路融冰中的应用研究 .....</b>                   | <b>133</b> |
| 9.1 输电线路覆冰的危害及防治措施 .....                                      | 133        |
| 9.2 自动融冰模式的控制策略及实现 .....                                      | 134        |
| 9.2.1 并网装置转变为 UPFC 进行线路融冰 .....                               | 134        |
| 9.2.2 并网装置转变为 SSSC 进行线路融冰 .....                               | 140        |
| 参考文献 .....                                                    | 146        |
| <b>第 10 章 基于功率传递的并网装置容量计算 .....</b>                           | <b>147</b> |
| 10.1 背靠背 VSC-HVDC 并网装置容量及参数计算 .....                           | 147        |
| 10.1.1 换流电抗器的参数计算 .....                                       | 147        |

|        |                                 |     |
|--------|---------------------------------|-----|
| 10.1.2 | VSC 直流侧电容参数设计                   | 150 |
| 10.1.3 | 换流变压器                           | 153 |
| 10.1.4 | 系统传递有功功率与无功功率最大值计算              | 153 |
| 10.2   | UPFC 容量的确定                      | 154 |
| 10.2.1 | UPFC 串联侧 VSC 的容量                | 154 |
| 10.2.2 | UPFC 并联侧 VSC 的容量                | 154 |
| 10.2.3 | UPFC 装置运行约束值的确定                 | 155 |
| 10.2.4 | 耦合变压器的容量                        | 155 |
| 10.2.5 | 直流电容的容量                         | 155 |
| 10.2.6 | 电感的选取                           | 156 |
| 10.3   | STATCOM 主电路参数的选取                | 157 |
| 10.3.1 | 等值电阻的取值                         | 157 |
| 10.3.2 | 等值电抗的取值                         | 158 |
| 10.3.3 | 直流侧电容的取值                        | 158 |
| 10.4   | 仿真验证                            | 158 |
|        | 参考文献                            | 162 |
| 第 11 章 | 基于背靠背 VSC-HVDC 同期并网复合实验装置的设计与实现 | 164 |
| 11.1   | 实验装置的设计与实现                      | 164 |
| 11.1.1 | 实验装置的主电路设计与实现                   | 164 |
| 11.1.2 | 实验装置的控制电路设计                     | 169 |
| 11.1.3 | 实验装置的控制及算法实现                    | 173 |
| 11.1.4 | 样机实验                            | 176 |
| 11.2   | 管理系统的设计与实现                      | 181 |
| 11.2.1 | 并网管理系统的整体设计                     | 181 |
| 11.2.2 | 系统的开发与实现                        | 183 |
|        | 参考文献                            | 197 |

# 第1章 绪论

## 1.1 电网间同期并列研究现状

在电力系统的发展过程中,电网互联的优势逐步显现出来。电网互联有助于实现水火互济和区域互补,达到更合理利用能源的目的。世界各国电力系统都在向互联方向发展,如北美的美国、加拿大、墨西哥的加利福尼亚半岛所形成的大的互联电网。我国电网电源与负荷之间的矛盾,要求进行远距离输电和区域电网的互联。区域电网互联构成大规模的互联电网,不仅具有资源优化配置能力强的显著优点,而且具有方便远距离,大容量接入火电、水电和核电常规电源的特点。这为大范围内消纳间歇式可再生能源创造了条件。大电网通过电网间的功率交换能够获得联网效益及不同能源类型的补偿效益。目前,我国电网已实现全国联网;并在积极发展交流 1000kV 和直流  $\pm 1100\text{kV}$  等特高压工程,其目的是进一步加强各电网之间的联系,实现资源的优化配置。

实现互联的电网规模庞大、结构复杂,系统中既有大量的旋转设备,又有大量的静止设备;既有交流设备,又有直流设备;既有常规设备,又有电力电子设备。设备之间连接的方式也因其功能的不同而大不相同。同时,电能的生产、输送、分配和消费是同时进行的,要保持电网稳定运行,使其能够抵御一定的扰动水平,必须对其所拥有的设备施加控制,使电力系统的功角、电压、频率和可靠性均满足要求。

电网互联后产生了诸如联络线功率波动、事故连锁波及、电磁环网环流等问题。电网结构复杂、运行方式变化多样,给电网运行控制带来了新的挑战,在极端条件下往往会引发系统故障的连锁反应,造成事故范围的扩大。电网间同期并列速度慢是供电恢复时间长的重要原因之一。大停电事故恢复速度慢、损失巨大,给电网快速并列的技术创新提出了强烈要求。对电力工作者来说,首先应该尽可能地防止大面积停电事故的发生。一旦发生大面积停电事故,应尽快采取措施恢复供电。

在事故情况下,电网间同期并网操作的安全性与快速性关系到系统供电能否快速恢复。目前,由于受严格同期并列条件的限制,同期并列完全依靠人工操作,操作涉及面较广,难度较大,并网速度较慢,成功率较低,这一现状使变电站中同期并列操作的自动化程度大大落后于电力系统的自动化水平,不满足智能电网的技术要求(He et al., 2008)。

电网中发电机组与电网间的同期并网普遍采用自同期或自动准同期装置。该装置能根据电网和机组之间的频率差与电压差,自动地调节发电机组的转速和电压,使发电机组与电网间快速地达到同期并列的条件,基本上实现了并网高度自动化。电网之间同期并列时,由于参与的变电站自身没有调整电网频率的手段,电力调度员要调度参与调频的调频电厂改变发电机组的有功出力,还要指挥变电站捕捉同期点进行合闸并网,三者之间协调配合才能完成并网工作,并网过程一般需要数十分钟,有时甚至会需要几个小时(贺长宏等,2008)。

在环网并列中,需要调整负荷潮流来满足并列点相角差的要求。在调整负荷潮流的过程中,可能会引起部分线路超过稳定极限、局部设备过载等问题,存在较多风险因素(Liu et al., 2009)。

将背靠背电压源换流器应用于电网间的同期并列操作,对电网间的差频同期并列和同频环网并列有十分重要的现实意义,主要体现在以下几个方面。

(1) 有利于提高电网恢复的速度。当电网发生故障时,系统解列为多个子系统,系统恢复过程需要比较长的时间。将背靠背电压源换流器用于电网间的同期并列操作时,可以大大缩短电网恢复过程所需的时间,最大限度地减少停电对社会生产和人民生活造成的损失。

(2) 有利于提高环网并列的速度。在长线路环网并列操作过程中,由于固定相角差的存在,需要调整负荷潮流的分布,通过降低并列点的相角差来满足并列条件。将背靠背电压源换流器用于电网间的同期并列操作,可以在变电站调整并列点两侧的有功功率从而降低并列点的相角差,提高环网并列速度。

(3) 拓展了背靠背电压源换流器的应用场合。目前,背靠背电压源换流器技术已经应用于多种场合,如变频器、轻型直流输电等,但对背靠背电压源换流器在电网间同期并列中的应用研究仍较少。将背靠背电压源换流器应用于电网间同期并列操作,使背靠背电压源换流器的应用领域得到进一步拓展。

同期并列时电压差、频率差和相角差必须在规定的范围内,否则会造成电力系统保护动作,系统振荡甚至解列。电压差过大会引起系统无功性质的冲击,频率差过大会引起系统有功性质的冲击,相角差包含这两种分量的冲击(叶念国,1998)。同期并列操作分为电源的并网操作,即发电机与电力系统的同期并列,以及电网和电网之间的同步互联及环网并列操作。

发电机并网过程中,自动准同期装置通过调节调速器和励磁能够减小电压差和频率差,并在相角差很小或者为零时发出合闸信号,使系统快速合闸(杨冠城,2007)。

变电站在同期合闸时较为复杂,需要电网调度人员、电网调频厂和变电站的全力协作配合,而且需要变电站操作人员手动操作合闸,没有实现并网自动化。这对进行同期并网的变电站操作人员的现场操作水平要求较高,否则会造成系统

振荡。因此，目前变电站的同期合闸只是捕捉相角差为零的时刻，而电压差和频率差则仅仅是作为合闸的限定条件，只要电压差和频率差满足一定的条件即可并网。变电站并网时采用这种方式虽然存在一定的波动，但是不会造成系统的崩溃解列。

## 1.2 VSC-HVDC 的发展和应用现状

瑞典 ABB 公司于 20 世纪 90 年代首次提出了轻型高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)的概念，之后轻型直流输电得到了迅速发展。电压源换流器型高压直流输电(voltage source converter high voltage direct current, VSC-HVDC)是将电压源换流器和大功率全控器件相结合，利用脉冲宽度调制技术控制调节电压源换流器的新型输电技术。由两电平换流器组成的 VSC-HVDC 电路原理图如图 1.1 所示。其中，交流滤波器、换流电抗器、直流电容器及换流桥组成换流器(刘志宏，2007)。换流桥桥臂根据承受电压大小由一定数量的绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)串联组成。交流滤波器的作用是滤除谐波，防止换流器产生的谐波注入交流系统中；换流电抗器可实现电压源换流器(voltage source converter, VSC)与电网之间的能量交换，同时对电网谐波有一定的滤除作用；直流电容器可缓冲桥臂上因 IGBT 关断而产生的冲击电流，可减小直流侧的谐波，为换流器提供电压支撑。

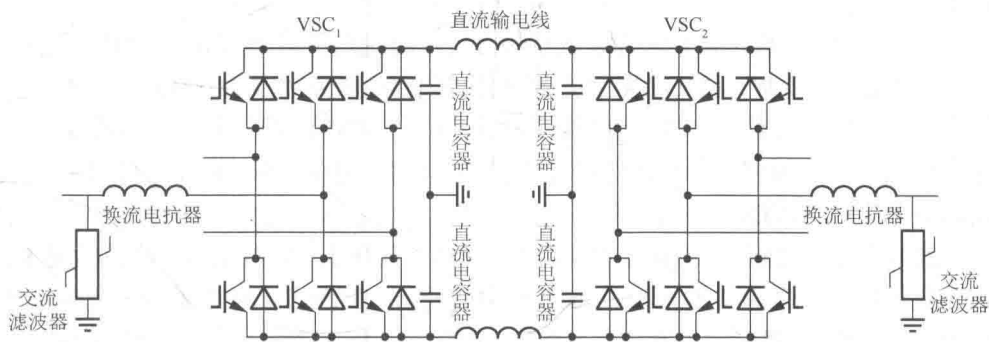


图 1.1 两电平 VSC-HVDC 电路原理图

VSC-HVDC 与传统的高压直流输电相比具有以下优势(明站起，2007；王风川，1999)。

(1) 轻型 HVDC 电流能够自关断，能够工作在无源逆变方式下，不依赖交流系统来维持电压和频率的稳定，运行独立，无须在换流站间建立通信，可以与无源网络或交流电网直接相联。

(2) 与电流源换流器型高压直流输电 (current source converter HVDC, CSC-HVDC) 相比, VSC-HVDC 采用脉冲宽度控制技术, 控制触发半导体器件快速输出任意交流电压相角或者电压幅值, 使有功功率和无功功率可以得到独立控制。

(3) VSC-HVDC 不消耗系统无功功率, 同时对母线电压具有静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 的稳定作用, 可动态补偿无功功率。在系统故障时能及时向故障系统提供有功功率和无功功率的紧急支援, 具有快速的故障恢复控制能力, 大大改善了系统的稳定性。传统高压直流输电往往需要安装大量的无功补偿装置, 不仅占地面积大, 而且输电线路的传输效率不高。

(4) 传统直流控制输电潮流反转时, 直流电流方向不变, 而是通过改变直流电压极性来实现。VSC-HVDC 可通过改变直流电流方向来控制潮流反转。VSC-HVDC 的这一特点有利于构成并联多端直流系统, 不仅方便控制系统潮流, 还大大提高了系统运行的可靠性。

(5) 在不增加系统短路容量的情况下, VSC-HVDC 可以灵活控制交流侧电流。在新增直流输电线路后, 不需要对交流系统的保护定值进行修改。

此外, VSC-HVDC 还具有便于工程应用的优点。国内外关于 VSC-HVDC 技术研究的热点主要集中在三方面, 即技术性研究、经济性研究、调试及试验研究。技术性研究包括拓扑结构、控制和保护性能研究; 经济性研究包括在输电领域 VSC-HVDC 系统的经济性比较; 调试及试验研究包括 VSC-HVDC 的试验和测试技术等。

ABB 公司在提出轻型直流输电的概念后, 还建立了首个 VSC-HVDC 试验工程——Hellsion 工程。该工程的主电路采用 IGBT, 装置容量为 3MW。工程试验积累了大量的运行数据和技术经验。在此基础上, VSC-HVDC 相关技术迅速发展并日渐成熟, 传输容量和电压等级逐步提高, 随后 ABB、Siemens 等公司又相继投入多个 VSC-HVDC 工程。

2011 年 2 月 28 日, 我国上海南汇风电场——南风 35kV 换流站首次成功充电。该工程包括两个直流换流站和 8km 直流输电线路, 其额定运行容量为 18MW, 直流额定电压为  $\pm 30\text{kV}$ , 直流额定电流为 300A, 是国内首座柔性直流变电站, 也是亚洲首个具有自主知识产权的柔性直流输电工程。2014 年, 我国在浙江舟山建设了世界上首个五端柔性直流输电工程, 实现了多个风电场同时接入和电力输送。我国还规划在张家口国家级新能源综合示范区和冬季奥林匹克运动会专区建设张北可再生能源  $\pm 500\text{kV}$  柔性直流电网示范工程, 构建输送大规模风、光、抽水蓄能等多种能源的四端环形柔性直流电网。

VSC-HVDC 还应用于不同额定频率的电力系统的互联, 如风力发电场、太阳能发电等与电力系统的联网, 或用于两个相同额定频率电网的异步互联, 实现电

力交易,如我国的灵宝背靠背工程,其实现了西北—华中电网的互联,完成西电东送任务;澳大利亚于2002年8月投入的Murray Link VSC-HVDC工程实现了本国南部River Land电网和Victoria电网的异步互联,是世界上著名的地下电缆输电项目之一。

### 1.3 VSC-HVDC 的控制策略研究现状

VSC-HVDC 已在向弱交流系统或无源系统供电、交流电网同步或异步互联、大规模风力发电等可再生能源并网等方面获得广泛应用,具有良好的应用前景。目前,大多数研究集中于 VSC-HVDC 在直流输电中的应用研究,很少有研究将其应用到电网间同期并列中。而关于 VSC-HVDC 系统的控制策略,已较多的相关文献,现归纳如下。

(1) 间接电流控制。间接电流控制通过控制交流电压的幅值和相位来间接控制交流电流的变化。刘和平等(2012)和侯世英等(2010)的控制策略就是间接电流控制。该方法不仅动态响应慢,受系统参数变化影响大,而且不具备过电流抑制能力,因此较少用于 VSC-HVDC 的实际工程中。

(2) 直接电流控制。控制 VSC 的输出电流依据控制器整定的电流波形变化,这种方法首先需经运算求出交流电流的指令值,再引入交流侧电流反馈,通过直接控制交流电流使其瞬时跟踪指令电流值,其控制方案大多是先由电压检测得到同步信号,再与控制器的计算电流幅值合成,得到参考电流  $i_A^*$ 、 $i_B^*$ 、 $i_C^*$ ,然后实测的电流差值与参考电流值通过相应的滞环比较器与 PI 调节器,得到下一个逆变器状态的开关状态值,以驱动逆变器(陈涛,2007;张兴等,2001)。这种控制方法又分为电流滞环控制、预测电流控制、同步旋转  $dq$  坐标系下的直接反馈解耦控制等多种控制方法。

图 1.2 为电流滞环控制示意图,其是依据系统电流实际值与电流给定值的误差来控制的。由于实际电流的变化滞后给定电流的变化,因此滞环电流控制不能快速地跟踪给定电流,响应速度较慢。

预测电流控制是利用电流下一步变化的预测值来完成控制器的当前动作,在一个开关周期内强迫电网电流按预测的期望电流来改变。这种方法在两相静止坐标下即可控制整个系统,大大简化了控制算法,且能够快速响应系统的变化,具有良好的控制性能。

同步旋转  $dq$  坐标系下的解耦控制,是从变流器的同步旋转  $dq$  坐标系下的状态方程入手,通过电流反馈和电压前馈实现同步旋转  $dq$  坐标系下的解耦控制。这种闭环控制方式动态响应迅速、鲁棒性好,具有很好的限流能力,避免了换流器承受过电流,因此被广泛应用于高压大功率的直流系统中。

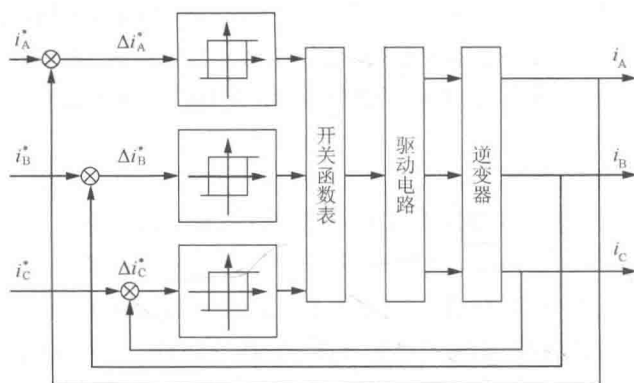


图 1.2 电流滞环控制示意图

本书根据电压源换流器可以同时独立地对有功功率和无功功率控制的特点，提出了基于功率传递的电网间同期并列新方法，并在此基础上开展了通过增加一台变压器和几台隔离开关将并网装置转换为 SSSC、UPFC 对并网后联络线进行潮流控制等联合控制和其转换为 STATCOM 实现母线电压稳定与无功补偿，以及在线路结冰条件下实现自动融冰等一系列研究，同时研究了并网所用换流器的容量及主电路参数设计方法，最后通过大量仿真验证了将背靠背 VSC-HVDC 用于电网间同期并列的正确性和有效性，通过复合系统功能转换应用，达到一套装置可以实现联络线安全控制、线路自动融冰及电网安全运行的目标，具有可观的经济效益，为智能电网运行提供技术支持与手段。

## 参 考 文 献

- 陈涛, 2007. 背靠背四象限电压源型变流器功率交换控制[D]. 吉林: 东北电力大学.
- 贺长宏, 姚孝孝, 刘家军, 等, 2008. 电网快速并列、线路自动融冰、无功静补复合系统的研究[C]. 中国电机工程学会年会, 西安: 20-25.
- 侯世英, 肖旭, 徐曦, 2010. 基于间接电流控制的并网逆变器[J]. 电力自动化设备, 30(6): 76-79.
- 刘和平, 邱斌斌, 彭东林, 等, 2012. 电流型脉宽调制整流器间接电流控制改进策略[J]. 电网技术, 36(6): 182-187.
- 刘志宏, 2007. 统一潮流控制器(UPFC)的建模与仿真[D]. 南昌: 南昌大学.
- 明站起, 2007. 轻型直流输电(VSC-HVDC)系统仿真研究及硬件实现[D]. 保定: 华北电力大学.
- 王风川, 1999. 电压源换流器式轻型高压直流输电[J]. 电网技术, 23(4): 74-76.
- 吴添森, 2010. 基于功率传递的电网间同期并列仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学.
- 杨冠城, 2007. 电力系统自动装置原理[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社.
- 叶念国, 1998. 由我国同期装置的现状所引发的思考[J]. 电网技术, 22(12): 74-77.
- 张兴, 张崇巍, 2001. 基于电流预测的高功率因数变流器电压矢量优化控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 16(3): 39-43.



HE C H, LIU J J, ZHAO X Q, 2008. Research of rapid parallel operation, automatic ice-melting on transmission lines, static VAR & compound system[C]. International conference on high voltage engineering and application, Chongqing: 128-133.

LIU J J, YAO L X, HE C H, et al., 2009. Research on rapid power grid synchronization parallel operation system[C]. Asia-pacific power and energy engineering conference, Wuhan: 1-4.