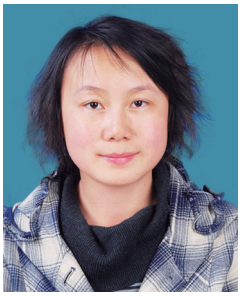
适应于孤岛供电柔性直流输电系统控制器研究设计

介绍了柔性直流输电系统相对传统直流输电系统优势，在此基础上开展柔性直流输电系统孤岛供电系统控制相关仿真研究。首先构架分析柔性直流输电系统供电模型，并给出简化数学模型。以简化后数学模型为分析基础进行坐标系推导变换，得出有功功率、无功功率解耦控制算法，并进一步设计出适用于孤岛供电系统柔性直流控制器。最后搭建Pscad/Emtdc仿真试验模型进行仿真试验验证，并对仿真结果进行了分析。

毛新红／新疆生产建设兵团兴新职业技术学院



毛新红／讲师

关键词/Keywords
VSC－HVDC·
孤岛·
MMC·
解耦控制器·
Pscad/Emtdc仿真·

基于电压源型高压直流输电技术即VSC－HVDC具有诸多称呼。目前国际上，如ABB称之为HVDC－Light，西门子称之为HVDC－Plus，国内称之为柔性直流输电系统，即Flex－HVDC。因此，在本文研究开展过程中，沿用国内称呼即柔性直流输电系统。相对于基于相控技术高压直流输电技术即LCC－HVDC，柔性直流输电技术具有诸多优势。如换流器件采用全控型器件IGBT代替传统的晶闸管，器件本身具有自关断能力，无须依靠交流电网提供换线电压来完成换流过程，不会出现引起能量中断换向失败问题；电压源型换流器在实现系统有功功率传输的同时，还能依靠自身为交流系统提供无功功率；换流器起动不依赖所连接的交流系统，可连接无源网络，适用于偏远山区供电、孤岛系统供电等传统直流输电系统无法完成的领域。

VSC－HVDC孤岛供电模型

1. VCS－HVDC孤岛供电原理

该孤岛供电系统由送端系统、直流线路和受端系统三部分构成。送端系统接入有源交流网络，通过联接变压器、换向电抗接入换流器，实现由交流电到直流电变换。换流器桥臂采用当前主流基于MMC原理链式结构，其结构如图1所示。受端系统为一孤岛供电系统，将通过换流器转换后交流电能通过换向电抗、联接变压器接入负载。为真实表征实际孤岛系统，其模拟负载系统包含三种类型负载，即固定负载系统、电阻型负载系统以及异步电动机负载系统。

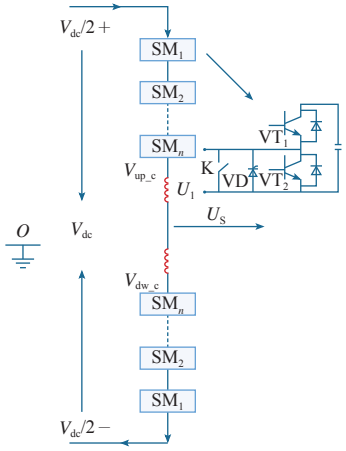


图1 单相桥臂拓扑结构

由图1可知，每相包含上下两个桥臂构成，中间通过桥臂电抗器串接构成，每个桥臂有n个子模块串联构成。每个子模块由2个IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）、2个二极管、1个模块电容、1个保护晶闸管以及1个高速旁路开关组成。

2. VCS－HVDC换流站结构

图2为单端换流站原理结构框图，连接电抗作为换流器与联接变压器连接枢

中国知网 https://www.cnki.net

纽，实现交流系统能量向换流器注入。其能量注入过程，也是换流器充电过程。具体过程可以分为如下两个阶段，即换流器闭锁阶段自由充电过程和换流器解锁阶段可控充电过程。换流器解锁阶段充电过程是通过控制换流器触发脉冲来完成的。换流器自由阶段充电过程是通过换流器各个子模块二极管构建交流回路来完成的。由于换流器自由充电阶段整个过程无法控制，通过串入充电电阻来抑制过高充电电流。下面将对换流器解锁后可控过程进行理论分析。

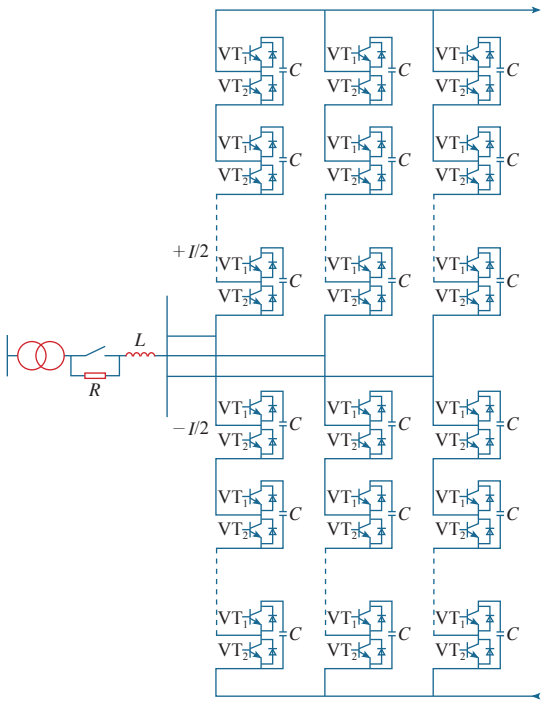


图2　单端换流站原理结构框图

VSC－HVDC数学模型分析

换流站等效简化结构模型如图3所示，不考虑联接变压器电抗阻抗损耗，则交流系统向换流器注入的有功功率P及无功功率Q分别为

$$P=\frac{U_S U_C}{X}\sin\delta \tag{1}$$

$$Q=\frac{U_S(U_S-U_C\cos\delta)}{X} \tag{2}$$

式中，U_S为交流母线电压基波分量；U_C为换流器输出电压的基波分量；δ为U_S超前U_C的相角；X为换流电抗器的电抗。

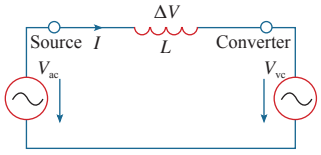


图3　换流站等效简化模型图

由式（1）可知系统有功功率传输主要取决于相角差δ，由式（2）可知系统无功功率传输主要取决于U_C。当$\delta>0$时，VSC工作在整流状态，交流系统向VSC注入有功功率；当$\delta<0$时，VSC工作在逆变状态，交流系统向VSC吸收有功功率。当$U_S-U_C\cos\delta>0$时，交流系统向VSC注入感性无功功率；当$U_S-U_C\cos\delta<0$时，交流系统向VSC吸收感性无功功率。因此，通过控制δ就可以控制交流系统向VSC输送有功功率的大小和方向，通过控制U_C就可以控制交流系统向VSC输送无功功率的大小和方向。

通过上述分析可知，系统有功功率输出主要取决于相角差δ，但系统相角差δ还将影响系统无功输出，因此二者存在耦合关系，即通过控制相角差δ在实现有功功率控制同时，将影响无功功率输出变化，无法实现对系统有功功率、无功功率的准确控制。

本文控制器具体设计过程中，将采用解耦控制算法，即在具体实现过程中通过前馈环节以及补偿环节设计，来准确实现对系统有功功率、无功功率控制。仍以图3简化模型为例进行分析。依据基尔霍夫定理可得

$$V_{ac}=\Delta V+V_{vc} \tag{3}$$

式中，ΔV为电抗器上等效压降。

$$\Delta V=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+R_L^i \tag{4}$$

将公式（4）带入公式（3）并分相展开可得

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{pmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-R/L&0&0\\0&-R/L&0\\0&0&-R/L\end{pmatrix}\begin{pmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}(V_{ac_a}-V_{vc_a})/L\\(V_{ac_b}-V_{vc_b})/L\\(V_{ac_c}-V_{vc_c})/L\end{pmatrix} \tag{5}$$

对公式（5）进行d_q坐标变化并移项重组可得

中国知网　https://www.cnki.net

$$\begin{cases} V_{vc_d} = V_{ac_d} - \left(Ri_d + L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} \right) + wLi_q \\ V_{vc_q} = V_{ac_q} - \left(Ri_q + L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} \right) - wLi_d \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} \Delta V_{L_d} = Ri_d + L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} \\ \Delta V_{L_q} = Ri_q + L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{7}$$

式（7）表示等效电抗上的等效压降，对该部分通过一阶比例积分的形式进行等效设计，即

$$\begin{cases} \Delta V_{L_d} = K_{pd}(i_{d_ref} - i_d) - K_{id}\int (i_{d_ref} - i_d)\mathrm{d}t \\ \Delta V_{L_q} = K_{pq}(i_{q_ref} - i_q) - K_{iq}\int (i_{q_ref} - i_q)\mathrm{d}t \end{cases} \tag{8}$$

将式（8）带入式（6）可得

$$\begin{cases} \Delta V_{vc_d_ref} = V_{ac_d} - K_{pd}(i_{d_ref} - i_d) - \\ \qquad K_{id}\int (i_{d_ref} - i_d)\mathrm{d}t + wLi_q \\ \Delta V_{vc_q_ref} = V_{ac_q} - K_{pq}(i_{q_ref} - i_q) - \\ \qquad K_{iq}\int (i_{q_ref} - i_q)\mathrm{d}t - wLi_d \end{cases} \tag{9}$$

式中，i_{d_ref}为对应系统有功功率参考；i_{q_ref}为对应系统无功功率参考；$V_{vc_d_ref}$为对应阀侧电压有功参考；$V_{vc_q_ref}$为对应阀侧电压无功参考。

对式（9）进行分析可知，换流器阀侧电压有功功率、无功功率，除受注入换流器有功、无功电流影响外，还受系统交流电压以及相互间有功电流、无功电流耦合影响。因此，在具体控制器设计环节，通过加入电流补偿环节来实现有功、无功功率解耦控制，通过加入电压前馈环节，实现有功功率、无功功率准确控制。

控制器设计

对用于孤岛供电系统柔性直流输电系统，由于其逆变侧为无源网络，因此其外环有功功率控制模式采用定交流频率控制方式，无功功率控制方式采用定交流电压控制方式。为保证功率传输过程中直流电压稳定，整流侧有功功率控制模式采用定直流电压控制方式，无功功率控制方式依据系统需要采用定交流电压控制或定无功功率控制方式。

1. 整流侧控制器设计

通过上述分析可知，整流侧有功功率控制模式采用定直流电压控制方式，无功功率控制模式采用定交流电压控制方式或定无功功率控制方式。本仿真系统中整流侧采用定无功功率控制方式。

2. 逆变侧控制器设计

通过上述分析，逆变侧有功控制模式采用定频率控制模式，无功控制采用定交流电压控制。

系统仿真及结果分析

1. 系统仿真模型参数配置

本仿真采用Pscad/Emtdc软件对柔性直流输电对孤岛负荷供电系统进行仿真分析。

整流侧主要系统参数如表1所示。

表1 整流侧主要设计参数

联接变压器连接方式	星接/角接	直流电压/kV	±200
联接变压器容量/MV·A	150	电平	31
交流系统电压/kV	220	连接电抗/H	0.05

逆变侧主要系统参数如表2所示。

表2 逆变侧主要设计参数

联接变压器连接方式	星接/角接	直流电压/kV	±200
联接变压器容量/MV·A	150	电平	31
交流系统电压/kV	220	连接电抗/H	0.05
异步电动机容量/MV·A	20	电阻负载/MW	10
常规负载/MV·A	40		

2. 仿真结果及分析

该柔性直流输电系统在Pscad4.2版本上完成，整流侧有功控制采用定直流电压控制，无功功率控制采用定无功功率控制；逆变侧有功功率控制采用定频率控制，无功功率控制采用定交流系统电压控制。试验内容具体包括稳态过程控制试验以及整流侧交流系统单相接地故障试验。试验波形分别如图4～图8所示。

图4和图6为整流侧稳态运行过程中交流系统电压、电流波形以及整流电压、直流电流波形，对图4、图6分析可知，交流系统电压、电流稳定，直流电压稳定运行在±200 kV。图5、图7为逆变侧稳态运行过程中交流系统电压、电流波形以及有功功率波形，对图5、图7分析可知，交流

中国知网 https://www.cnki.net

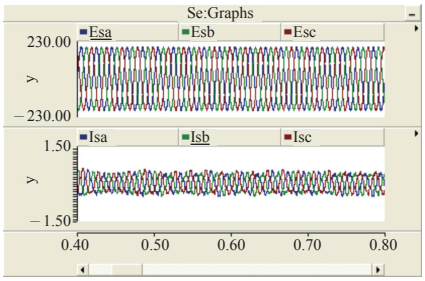


图4　整流侧稳态交流电压、电流

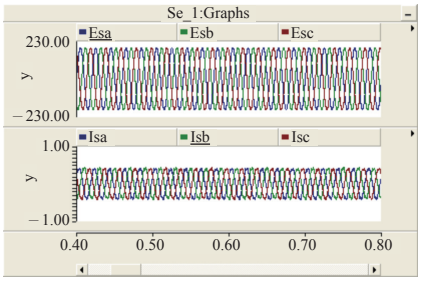


图5　逆变侧稳态交流电压、电流

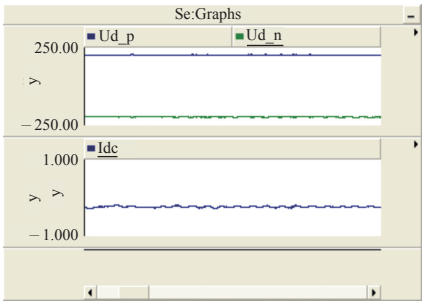


图6　整流侧直流电压控制模式下电压、电流

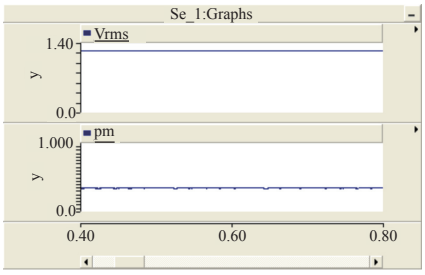


图7　逆变侧频率控制模式下交流电压、功率

系统电压、电流稳定运行，直流有功功率稳定，不存在波动情况。图8为整流侧交流系统单行接地故障前后交流系统电压、直流系统电压波形，由图8可知，交流系统故障过程中，直流电压没有明显波动发生，系统运行稳定。综上所述，本文针对孤岛供电系统所设计的控制器无论系统在稳态

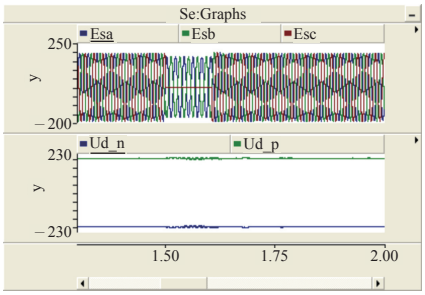


图8　整流侧故障前后交流、直流系统电压

运行模式还是暂态故障情况下，均能实现对系统有功功率、无功功率的准确控制。

结束语

本文分析了柔性直流输电对孤岛负荷供电的工作原理、电压源换流器模型和孤岛负荷模型，分别对整流站和逆变站控制器进行了设计，最后运用Pscad/Emtdc仿真软件对柔性直流输电对孤岛负荷供电模型进行了仿真，并对仿真结果进行分析。通过解耦控制器设计，准确实现有功功率、无功功率解耦控制，暂态故障下确保系统稳定运行。

目前，由于IGBT器件本身过电流能力较差，在一定程度上限制了将柔性直流输电技术应用于大容量直流输电工程。随着科技进步，IGBT器件本身过电流能力提高以及相关替代产品的出现，柔性直流输电技术有望取代现阶段基于晶闸管换流直流输电技术，应用于高压、特高压直流输电工程。

参考文献

[1] 王国强，王志新，李爽．模块化多电平变流器的直接功率控制仿真研究 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (6)：64-71．

[2] 范心明，管霖，夏成军，等．多电平柔性直流输电在风电接入中的应用 [J]．高电压技术，2013，39 (2)：497-504．

[3] 刘兵，阮江军，韩海宏，等．柔性直流输电系统电磁环境分析 [J]．高电压技术，2009，35 (11)：2748-2752．

（收稿日期：2015－01－18）EA

中国知网　https://www.cnki.net