

# 适用于风电并网柔性直流控制器设计

针对传统风电并网对交流系统稳定运行产生的不利因素,提出采用柔性直流输电系统完成风电并网外送。首先给出基于柔性直流输电系统风电并网系统结构设计,并针对该系统结构展开理论分析,提出适合风电系统接入送端换流器控制功能配置、受端换流器控制功能配置。详细分析换流器桥臂结构及子模块模型结构,在上述分析基础上,进行整流侧频率控制器设计、交流电压控制器设计、逆变侧直流电压控制器设计和无功控制器设计。最后,在PSCAD/EMTDC完成上述一次模型搭建以及控制策略的仿真验证,对仿真结构进行总结分析。

蒋 威 付国定 李 娜/河南工程学院电气信息工程学院



蒋 威/工程硕士

风力发电作为一种清洁能源,近年来获得快速发展,截止2015年,全国风电装机容量达到100 GW以上。随着西部清洁能源开发加速以及传统能源资源的逐步枯竭,风电在我国电力能源中比重将逐年升高。传统的风电并网是直接的风能转化为交流电能后直接通过汇流母线接入变压器,升压后直接接入交流电网,然而随着大规模风电并网接入,给交流系统稳定性带来很大影响。对继电保护系统提出新的挑战,使得传统交流继电保护系统已经不能满足当地交流系统稳定运行需求。因此,近年来很多风电场风机处于空转运行状态,造成大量清洁能源浪费。

## 关键词/Keywords

风电并网 ·  
柔性直流输电 ·  
频率控制 ·  
直流电压控制 ·  
PSCAD/EMTDC ·

柔性直流输电技术作为一种新型的直流输电技术,在具有传统直流输电优点(如不增加交流系统短路容量、功率调节速度快和无转动惯量等)同时,还存在很多方面的优点是传统直流输电技术无法企及的。如不存在换向失败问题,在实现有功功率调节同时可以额外为交流系统提供无功支撑,对于采用MMC模式换流器,电能质量好,不需要配置交流滤波器等。

将风力发电技术和柔性直流输电技术相结合,由柔性直流输电系统完成风电并网,将彻底解决风电接入后交流系统短路容量扩大问题,不需对原有交流保护系统进行再升级改造。同时,还能很好解决风电上网后电网稳定问题以及电能质量问题。因此,国内外均在研究如何通过柔性直流输电系统完成大规模风电并网问题。

## 依靠柔性直流输电系统风电并网结构

### 1. 风电并网结构

采用柔性直流输电系统接入交流电网风电并网结构如图1所示。该系统为一个双端柔性直流输电系统结构。换流器送端连接风电场,换流器受端接入交流电网。由图1分析可知,对送端系统

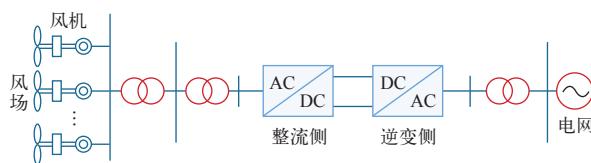


图1 风电场并网的柔性直流输电系统结构图

而言,风电场产生电能通过汇流母线收集后接入升压变压器,升压变压器输出接入送端联接变压器,送端联接变压器通过连接电抗接入送端换流器,由送端换流器完成由交流电到直流电的转换。受端换流器通过直流母线接收送端电能,并将之转化为交流电能通过连接电抗器接入受端交流电网,完成风电并网过程。

## 2. 柔性直流输电换流器结构

对送端而言,柔性直流输电系统采用换流器将送端交流电能转换为直流电能;对受端而言,柔性直流输电系统采用换流器将接收到的直流电能转换为交流电能。其换流器结构如图2所示。由图2分析可知,该换流器桥臂结构为模块化结构设计,每相桥臂由 $N$ 个子模块串联构成。每相由上下两个桥臂构成,中间通过桥臂电抗器串接构成。该子模块为半桥型子模块结构设计,由两个带有反向并联二极管的IGBT元件桥接构成。并联电容器模块为储能模块。子模块中晶闸管主要用于相关故障保护,防止过大电流流入IGBT器件,造成器件损坏。旁路小开关主要用于隔离故障模块,当子模块出现故障后,阀控系统将会触发旁路开关,退出该子模块运行状态。若假定每个子模块电容经过控制后稳态电压被控制在 $U$ ,即该模块投入情况下子模块输出电压为 $U$ ,退出情况下,模块电压为输出电压为0。单独对该相桥臂而言,其桥臂电压输出能力在0到 $N$ 倍 $U$ 之间变化。

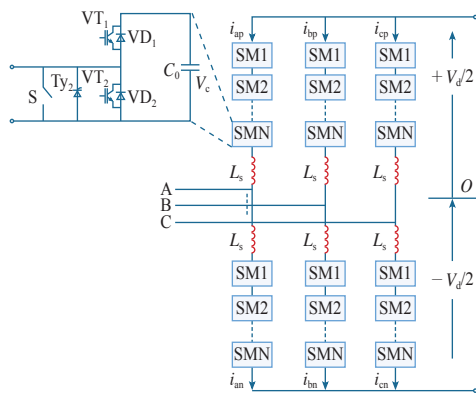


图2 柔性直流换流器结构模型

## 柔性直流输电系统的数学模型

若将换流器看成无转动惯量的电压源,则图2

所示换流器结构可以等效为图3所示数学模型,即换流器简化结构模型。

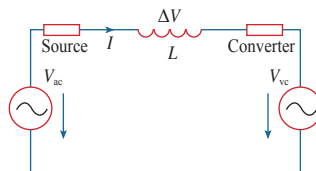


图3 换流器简化结构数学模型

由图3可知,连接电抗左侧交流系统等效为系统侧电压源、连接电抗右侧等效为可变电压源。依据基尔霍夫定理可得

$$V_{ac} = \Delta V + V_{vc} \quad (1)$$

式中, $\Delta V$ 为电抗器上等效压降。

$$\Delta V = L \frac{di}{dt} + R_L i \quad (2)$$

将式(1)展开并移项可得

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_{ac\_a} - V_{vc\_a}}{L} \\ \frac{V_{ac\_b} - V_{vc\_b}}{L} \\ \frac{V_{ac\_c} - V_{vc\_c}}{L} \end{pmatrix} \quad (3)$$

对式(3)进行 $dq$ 坐标系变换,可得 $dq$ 旋转坐标系换流器数学模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_{sd} - v_d \\ u_{sq} - v_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} -R & -\omega L \\ \omega L & -R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, $i_{sd}$ 和 $i_{sq}$ 分别为阀侧交流电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $u_{sd}$ 和 $u_{sq}$ 为阀侧电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $v_d$ 、 $v_q$ 为换流器输出交流电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $R$ 和 $L$ 分别为连接电抗等效电阻和电感; $\omega$ 为角频率。

对式(4)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电流、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。即有功电流既影响系统有功功率,亦影响系统无功功率;无功电流既影响系统有功功率,亦影响系统无功功率。因此,在具体控制器设计环节,需要消除上述相互间影响,解除上述耦合关系。对式(4)进行推导分析可知,若在实际控制器中通过加入电流补偿环节来实现有功功率、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。详细内环控制器设计如图4所示。

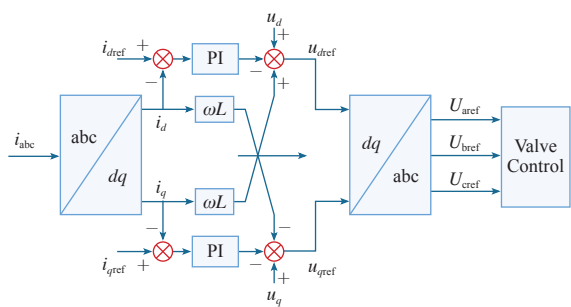


图4 换流器内环控制器设计

柔性直流输电系统控制策略

柔性直流输电系统送端通过升压变压器接入风电场，受端与交流系统相连（见图1）。正常运行工程中，对应送端而言，由于风电场风速处于波动过程中，其输出有功功率也伴随风速变化而变化。若采用定有功功率控制模式运行，由于风电场输出功率随风速变化而变化，将造成输送功率不足或输送功率过剩情况，造成送端风场电压频率上下波动。因此，送端有功控制模式采用定有功功率控制。此外，风电场正常运行过程中要从交流系统吸收无功功率，其系统功率大小随风速变化而变化，因此送端无功控制模式易采用定交流电压控制。

系统正常运行过程中，为了维持系统有功功率和直流电压的稳定，系统中必须有一个换流站采用定直流电压控制，又由于送端有功控制模式采用定交流频率控制模式，因此受端有功控制模式采用定直流电压控制模式，无功控制模式依据实际需要采用定交流电压控制或定无功功率控制，本研究系统受端无功控制模式采用定交流电压控制。送端换流站控制器如图5所示。受端换流站控制器如图6所示。

仿真分析

为验证上述分析正确性，在PSCAD/EMTDC完成上述仿真模型搭建，以及双端控制器设计。整流侧主要设计参数如表1所示。

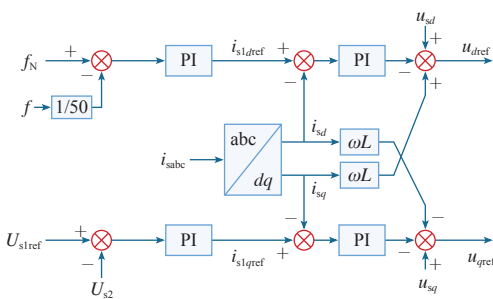


图5 送端换流站控制器

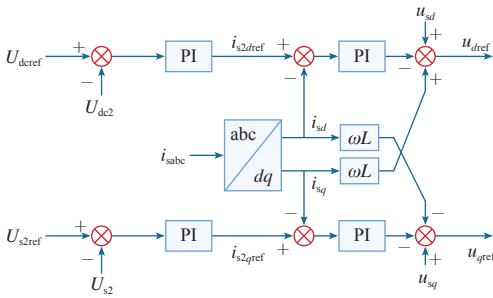


图6 交直流并列运行时受端换流站控制器

表1 整流侧主要设计参数

| 名称        | 参数    | 名称      | 参数      |
|-----------|-------|---------|---------|
| 连接方式      | 星接/角接 | 直流电压/kV | ±210    |
| 容量/MV·A   | 300   | 电平      | 31      |
| 交流系统电压/kV | 230   | 连接电抗/H  | 0.05    |
| 有功功率控制    | 定频率控制 | 无功功率控制  | 定交流电压控制 |

逆变侧主要系统设计参数如表2所示。

表2 逆变侧主要设计参数

| 名称        | 参数      | 名称      | 参数      |
|-----------|---------|---------|---------|
| 连接方式      | 星接/角接   | 直流电压/kV | ±210    |
| 容量/MV·A   | 300     | 电平      | 31      |
| 交流系统电压/kV | 230     | 连接电抗/H  | 0.05    |
| 有功功率控制    | 定直流电压控制 | 无功功率控制  | 定交流电压控制 |

具体实现过程中，整流侧有功控制采用定交流系统频率控制，无功控制模式采用定交流电压控制；逆变侧有功控制采用定直流电压控制，无功控制模式采用定无功功率控制。为验证上述控制器能够准确实现对送端电网频率跟踪控制，整个仿真试验分为两个部分，即稳态试验和动态试验。稳态试验验证系统能够准确实现对送端交流系统频率控制，动态试验验证当风电场风速变化情况下，通过定频率控制，交流系统频率稳定在

预设值。具体仿真结果分别如图~图10所示。

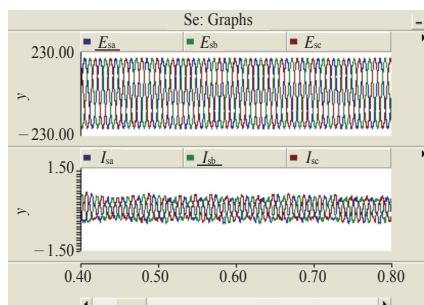


图7 送端稳态交流电压、电流波形

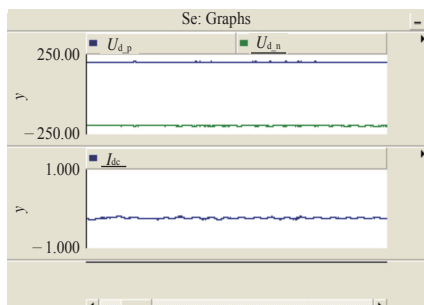


图8 受端稳态交流直流电压、电流波形

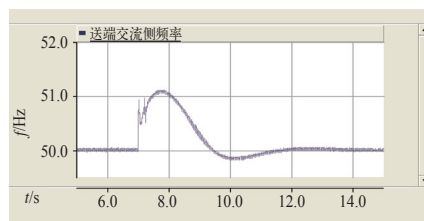


图9 送端电网频率波形

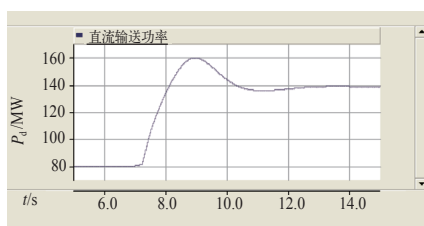


图10 送端电网功率波动

图7、图8分别为系统稳态运行工况下整流侧交流电网电压、电流稳态录播以及逆变侧直流电压、直流电流稳态录播。对上述录播进行分析可知,稳态运行过程中,直流电压、电流稳定,交流系统电压、电流稳定。图9、图10为送端由于风速提高,交流系统频率提高,为稳定交流系统频率,直流输送功率增加,将送端交流系统频率稳定在额定频率。综上分析,无论系统在稳

态或动态运行过程中,整流侧采用定频率控制模式、定交流电压控制模式,逆变侧采用定直流电压控制模式设计,并结合有功功率、无功功率解耦控制器设计,能够实现直流系统稳定运行控制。

## 结束语

本文分析了采用柔性直流输电系统进行风电并网的系统结构原理、电压源换流器桥臂结构模型和适用于风电并网的柔性直流输电系统两端控制功能配置,并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系统风电并网模型进行了仿真,并对仿真结果进行分析。通过解耦控制器设计,实现送端交流系统频率稳定控制,受端直流电压稳定控制。暂态故障下,确保系统快速响应,通过直流功率快速调节,保证基于柔性直流输电系统风电并网系统直稳定可靠运行。

## 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] 曹春刚,赵成勇,陈晓芳.MMC-HVDC系统数学模型及其控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(4):13-18.
- [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.
- [4] 王国强,王志新,张学燕.海上风电场柔性直流输电变流器的无源性控制策略[J].电力自动化设备,2011,31(8):11-15.
- [5] 任敬国,赵建国,于大洋,等.VSC-HVDC输电系统模式切换控制策略[J].电力系统自动化,2012,36(6):69-73,111.
- [6] 黄川,王志新,王国强.基于MMC的海上风电场柔性直流输电变流器仿真[J].电力自动化设备,2011,31(11):23-27.

(收稿日期:2015-01-12) EA