

弱送端的高压直流输电系统功率回降策略设计

李林¹, 赵文强¹, 刘建坤², 汪成根²

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

摘要:当与高压直流输电系统送端相连的交流系统为弱系统时,直流系统的调制功能将发挥更加重要的作用,直流系统将是稳控系统一个重要的调制手段。在送端电网损失大电源的情况下,稳控系统需回降直流功率,由于直流系统存在最小运行功率,当需要回降的功率大于直流最大功率回降量时,即使将直流系统回降至最小运行功率,仍会出现回降量不足的情况,将导致稳控系统切除送端电网负荷。为了避免送端电网事故情况下稳控切除负荷,研究并提出了直流系统双极紧急回降量不足情况下的调制策略,并对直流系统与稳控系统的接口方式和交换信息进行了设计,开发了直流控制系统程序,搭建了RTDS仿真系统,验证了该策略的实用性和可实施性,为送端电网为弱系统的直流工程提供有益的参考和借鉴价值。

关键词:直流输电;弱送端;稳控系统;功率回降;接口

中图分类号:TM721.2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2016)02-0007-04

高压直流输电具有输送功率大、启动和调速快、可控性强等优点,对有功功率输送和无功功率消耗均有灵活的调控能力,可用于快速改善交流系统的运行特性^[1]。在远距离输电、跨区电网互联中得到了广泛应用,已经成为电网中的一个重要组成部分,是影响电网安全稳定运行的一个重要因素^[2,3]。高压直流输电系统与稳控系统之间配合工作,在高压直流输电系统送端为弱交流系统的条件下,高压直流输电系统的调制功能发挥更加重要的作用^[4]。

1 弱交流系统定义及功率回降问题

与直流系统互连的交流系统有强弱之分,系统越强则越稳定。短路比是衡量交流系统强弱的重要指标,是一种简洁、快速评估直流系统稳定性的方法。短路比定义为交流系统短路的容量与直流换流器的额定功率之比^[5-7],即:

$$\text{短路比} = \frac{\text{交流系统短路容量}}{\text{直流系统额定功率}} \quad (1)$$

交流系统短路容量由下式推出:

$$\text{交流系统短路容量} = \frac{V_c^2}{Z_{st}} \quad (2)$$

式(2)中: V_c 为额定功率下的换相母线电压; Z_{st} 是交流系统的戴维南等效阻抗,没有考虑无功补偿设备。

当考虑无功补偿设备的影响时,采用的是有效短路比,即:

$$\text{有效短路比} = \frac{\text{交流系统短路容量} - \text{无功补偿}}{\text{直流系统额定功率}} \quad (3)$$

一般认为当有效短路比大于3时系统为强系统,当有效短路比在2~3之间为弱系统,小于2时为极弱系统。这种方法主要是根据交流系统的强弱来衡量换

流站母线电压的稳定性,也就是把直流输电作为换流站交流母线的负载,以短路比大小来衡量交流系统的带负载能力的强弱。在我国,青藏直流工程拉萨侧为典型的弱交流系统,呼辽直流工程呼伦贝尔侧孤岛运行时为极弱交流系统,处于黑启动初期的交流电网为极弱交流系统。在弱交流系统下,直流系统是稳控系统的一个重要的调制手段,直流系统应具备连续执行稳控的调制命令的能力。

直流双极运行时,存在最小双极运行功率,直流双极的最大功率回降量等于直流双极运行功率减去最小双极运行功率,若送端电网为弱交流系统,在损失大电源的情况下,稳控系统需直流系统回降功率,当需回降的功率大于直流最大功率回降量时,即使将直流系统功率紧急回降至最小运行功率,仍会出现回降量不足的情况,将导致稳控系统切除送端电网负荷。因此,为尽量避免送端电网事故情况下稳控系统切除负荷,应研究直流系统双极紧急回降量不足情况下调制策略。

2 双极紧急回降量不足时的调制策略

在送端电网发生主力机组跳闸等损失功率的故障情况下,稳控系统根据损失功率的大小将直流的功率回降量指令发给直流控制系统,直流控制系统根据回降量指令的大小采取以下调制策略。为描述方便,将双极最大可回降功率定义为 $P1$,将极I最大可回降功率+极II实时运行功率定义为 $P2$,将极II最大可回降功率+极I实时运行功率定义为 $P3$,将双极实时运行功率定义为 $P4$,将稳控发出的回降量指令定义为 $P5$ 。

(1) 若 $P5 \leq P1$,直流控制系统根据稳控系统发来的指令紧急回降直流;

(2) 若 $P1 < P5 < P2(P3)$,直流控制系统紧急闭锁一极(非控制极),剩余的功率损失量($P5 - P1$)由另一极(控制极)紧急功率回降;

(3) 若 $P_2(P_3) \leq P_5 < P_4$, 直流控制系统紧急闭锁一极(非控制极), 并将另一极(控制极)功率紧急回降至最小运行功率;

(4) 若 $P_4 \leq P_5$, 直流控制系统紧急闭锁双极;

(5) 直流控制系统在上述功能紧急闭锁单极的情况下, 应避免闭锁极功率转代至健全极。

3 直流系统与稳控系统的接口方式设计

为了实现双极紧急回降量不足情况下的调制策略, 需要对直流系统与稳控系统的接口方式进行设计, 在现有的直流工程中, 直流控制系统与稳控系统的接口方式分为硬接点接口方式和光纤通信接口方式^[8,9]。

(1) 硬接点接口方式。稳控装置通过硬接点连线送开关量至极控装置, 每一个开入表示一档, 每一档将提升或回降固定的功率, 这样损失或者补偿的功率就可能与固定提升回降的功率不一致, 造成功率偏差。如果直流两端的交流系统很强, 偏差对系统影响不大; 当两端的系统都较弱时, 偏差对电网的稳定影响较大^[10]。

(2) 光纤通信接口方式。稳控装置与控制系统的接口用光纤直连, 可采用标准的 IEC 60044-8 协议或其他通信协议, 稳控装置将给控制系统发送功率提升或者回降的命令, 并发送具体的数值; 这种光纤直连的连接方式, 不仅接线简单, 且功率调制是连续的。

因此, 送端与弱交流系统相连的高压直流输电系统与稳控系统的接口应选择光纤通信方式。其通信结构如图 1 所示, 每套稳控装置分别与极 1、极 2 共 4 套极控装置相连。

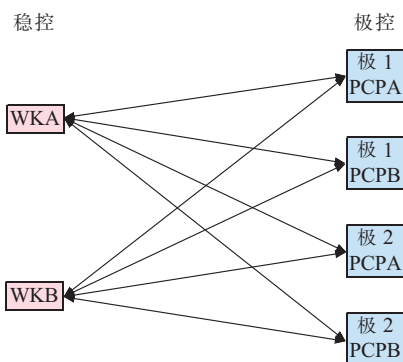


图 1 直流极控系统与稳控系统通信连接示意图

4 直流系统与稳控系统的交换信息设计

为了实现双极紧急回降量不足情况下的调制策略, 直流极控系统和安控系统之间通过数字接口传输信息。

4.1 极控发给稳控的模拟量信号

(1) 单极最大运行功率: 实时电压 $\times 1.1$ 倍额定电流;

(2) 双极最大可提升量: (极 I 实时电压 + 极 II 实时电压) $\times 1.1$ 倍额定电流 - 双极实时运行功率;

(3) 双极最大可回降功率: 双极实时运行功率 - (极 I 实时电压 + 极 II 实时电压) $\times 0.1$ 倍额定电流;

(4) 极 I 最大可回降功率 + 极 II 实时运行功率, 极 I 最大可回降功率: 极 I 实时运行功率 - 极 I 实时电压 $\times 0.1$ 倍额定电流;

(5) 极 II 最大可回降功率 + 极 I 实时运行功率, 极 II 最大可回降功率: 极 II 实时运行功率 - 极 II 实时电压 $\times 0.1$ 倍额定电流;

(6) 双极实时运行功率。

4.2 极控发给稳控的开关量信号

(1) 直流极闭锁信号; (2) 直流电流可调信号; (3) 极紧急停运信号; (4) 功率方向信号; (5) 双极控制模式信号; (6) 控制极信号; (7) 值班系统信号。

4.3 稳控发给极控的模拟量信号

(1) 功率提升量(正常发 0);

(2) 功率回降量(正常发 0)。

5 功率回降功能的 RTDS 试验验证

根据直流系统双极紧急回降量不足时的调制策略开发了控制系统程序, 搭建了仿真系统, 仿真系统结构如图 2 所示。

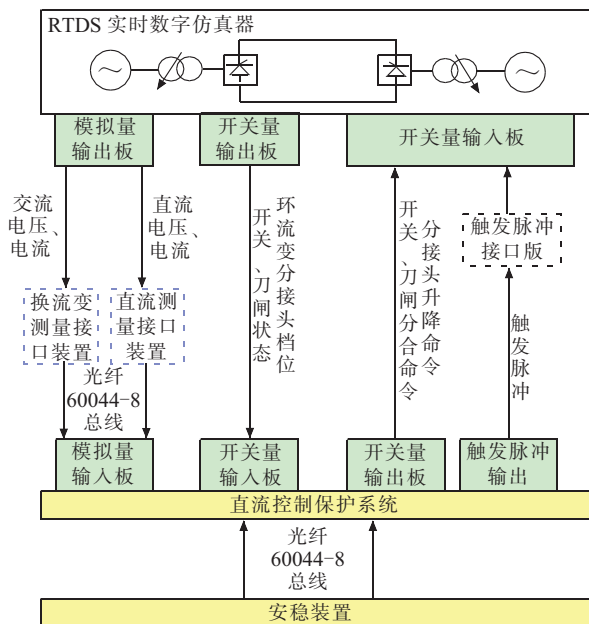
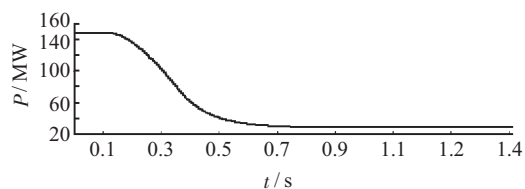


图 2 仿真系统示意图

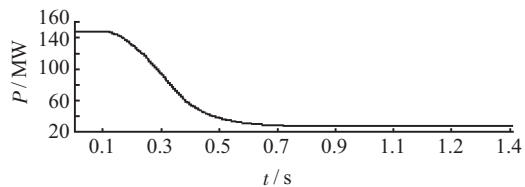
图 2 包含了 RTDS、直流控制保护系统和稳控装置, 进行了 RTDS 试验验证。试验条件为双极功率控制, 极 1、极 2 功率均为 150 MW, 电压均为 400 kV, 额定电流均为 750 A, 则单极最小功率为 30 MW, $P_1=240$ MW, $P_2=270$ MW, $P_3=270$ MW, $P_4=300$ MW。

5.1 试验项目 1

(1) 试验项目 1。收到稳控回降功率指令 $P_5=240$ MW, $P_5 \leq P_1$, 直流控制系统根据稳控系统发来的指令紧急回降直流。试验波形如图 3 所示。



(a) 极 1 的功率变化



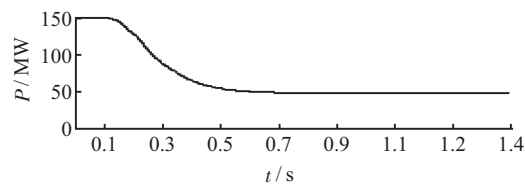
(b) 极 2 的功率变化

图 3 $P_5 \leq P_1$ 时的极 1 及极 2 功率变化波形

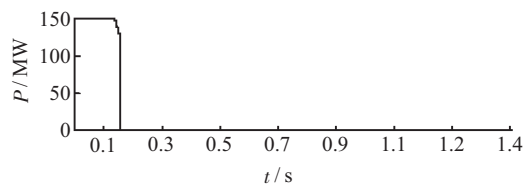
(2) 试验结果。极 1、极 2 的功率均由 150 MW 降至 30 MW,与设计策略一致。

5.2 试验项目 2

(1) 试验项目 2。收到稳控回降功率指令 $P_5=250$ MW, $P_1 < P_5 < P_2(P_3)$, 直流控制系统紧急闭锁一极(非控制极), 剩余的功率损失量 $(P_5 - P_1)$ 由另一极(控制极)紧急功率回降。试验波形如图 4 所示。



(a) 极 1 的功率变化



(b) 极 2 的功率变化

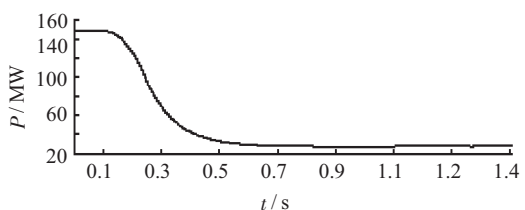
图 4 $P_1 < P_5 < P_2(P_3)$ 时的极 1 及极 2 功率变化波形

(2) 试验结果。极 1(控制极)的功率由 150 MW 降至 50 MW, 极 2(非控制极)闭锁, 功率由 150 MW 降至 0 MW, 与设计策略一致。

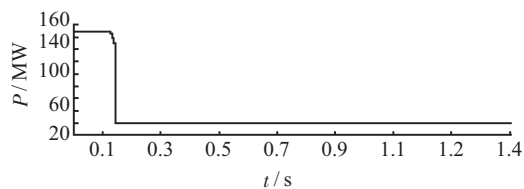
5.3 试验项目 3

(1) 试验项目 3。收到稳控回降功率指令 $P_5=285$ MW, $P_2(P_3) \leq P_5 < P_4$, 直流控制系统紧急闭锁一极(非控制极), 并将另一极(控制极)功率紧急回降至最小运行功率。试验波形如图 5 所示。

(2) 试验结果。极 1(控制极)的功率由 150 MW



(a) 极 1 的功率变化



(b) 极 2 的功率变化

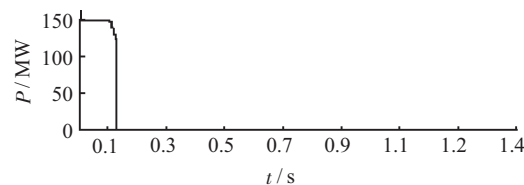
图 5 $P_2(P_3) \leq P_5 < P_4$ 时的极 1 及极 2 功率变化波形

降至 30 MW, 极 2(非控制极)闭锁, 功率由 150 MW 降至 0 MW, 与设计策略一致。

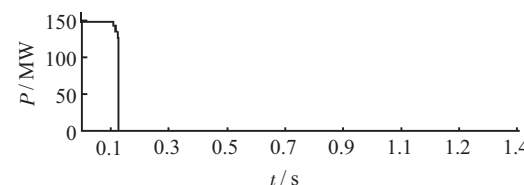
5.4 试验项目 4

(1) 试验项目 4。收到稳控回降功率指令 $P_5=300$ MW, $P_4 \leq P_5$, 直流控制系统紧急闭锁双极。

(2) 试验结果。极 1、极 2 均闭锁, 功率由 150 MW 降至 0 MW, 与设计策略一致。试验波形如图 6 所示。



(a) 极 1 的功率变化



(b) 极 2 的功率变化

图 6 $P_4 \leq P_5$ 时的极 1 及极 2 功率变化波形

6 结束语

本文分析了送端与弱交流系统相连的高压直流输电系统双极功率紧急回降不足时稳控切负荷的问题, 提出了直流双极功率紧急回降量不足时的调制策略, 并对直流系统与稳控系统的接口方式和交换信息进行了设计, 开发了直流控制系统程序, 搭建了 RTDS 仿真系统, 验证了该策略的实用性和可实施性, 对其他类似直流工程与稳控系统接口及处理策略提供了参考。

参考文献:

- [1] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 32-36.
- [2] 孙光辉. 区域稳定控制中若干技术问题[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 4-7.
- [3] 任祖怡, 左洪波, 吴小辰, 等. 用于安全稳定控制的高压直流极闭锁判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 41-44.
- [4] 康建爽, 曹森, 张民, 等. 高压直流输电系统双极功率调制异常分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 147-153.
- [5] 贾俊川, 赵兵, 罗煦之, 等. 青藏直流投运后藏中电网稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 104-109.
- [6] 郭小江, 汤涌, 郭强, 等. CIGRE 多馈入直流短路比指标影响因素及机理[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 69-74, 81.

- [7] 王鹏飞,张英敏,李兴源,等.基于无功有效短路比的交直流交互影响分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(6):74-78,85.
- [8] 赵森林,王永平,李林,等.青海—西藏±400 kV 直流联网工程的控制保护策略优化.电力系统自动化,2013,37(9):129-133.
- [9] 梁少华,夏尚学,霍超,等.青藏直流稳控与极控系统的接口及协调控制方法[J].电力系统自动化,2014,38(8):125-128.
- [10] 吴林平,张庆武,王俊生,等.高压直流工程中交直流系统协调控制接口方式[J].南方电网技术,2011,05(2):22-25.

作者简介:

- 李林(1980),男,安徽太和人,工程师,研究方向为高压直流输电控制技术;
- 赵文强(1985),男,湖北鄂州人,工程师,研究方向为高压直流输电控制技术;
- 刘建坤(1980),男,山东潍坊人,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定;
- 汪成根(1981),男,安徽桐城人,工程师,研究方向为电力系统安全稳定。

Design of Runback Strategy for HVDC System with Weak System at Sending end

LI Lin¹, ZHAO Wenqiang¹, LIU Jiankun², WANG Chenggen²

(1.Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: When the AC system connected with the sending end of HVDC power transmission system is a weak system, the modulation function of HVDC plays an important role. The HVDC system is an important means of modulation for stability control system. In the case of large power loss in the sending end, the stability control system needs to reduce the power HVDC delivered. Because of the minimum operating power limit of the HVDC system, when the power needed to reduce is greater than the maximum power which can be reduced, even if the power HVDC delivered runback to minimum operating power, it is still not enough and can lead to cutting off load in the sending system. In order to avoid cutting off load in the sending end, the modulation strategy for the condition that HVDC bipolar runback is not enough is proposed. The interface mode and information exchange between HVDC and stability control system are designed, and the HVDC control system program is developed. The proposed strategy and developed interface have been verified in RTDS. The simulation results show that the strategy is practical and effective. This research provides a reference for future similar projects.

Key words: HVDC; weak sending end; stability control system; runback; interface

(上接第6页)

- [49] 陈伟根,范海炉,王有元,等.基于小波能量与神经网络的断路器振动信号识别方法[J].电力自动化设备,2008,28(2):29-32.
- [50] 胡晓光,齐明,纪延超,等.基于径向基函数网络的高压断路器在线监测和故障诊断[J].电网技术,2001,25(8):41-44.
- [51] 孙来军,胡晓光,纪延超.基于支持向量机的高压断路器机械状态分类[J].电工技术学报,2006,21(8):53-58.
- [52] 黄建,胡晓光,巩玉楠.基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2011,31(12):108-113.
- [53] LU C, HU X G. Classification of Mechanical Conditions for HVCBs Based on Artificial Immune Network [C]. 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapo-

re, 2008:2373-2377.

- [54] 吕超,于洪海,王立欣.基于人工免疫网络的断路器在线自主学习故障诊断[J].中国电机工程学报,2009,29(34):128-134.

作者简介:

- 杨景刚(1984),男,陕西咸阳人,高级工程师,从事全过程技术监督与开关类设备专业技术管理工作;
- 刘媛(1989),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,从事高压开关设备故障诊断相关研究以及开关类设备专业技术管理工作;
- 高山(1971),男,江苏盐城人,高级工程师,从事全过程技术监督与开关类设备专业技术管理工作;
- 陈曦(1988),男,辽宁锦州人,硕士研究生,从事高压开关设备故障诊断相关研究以及开关类设备专业技术管理工作。

Review on Mechanical Fault Diagnosis of High-voltage Circuit Breakers

YANG Jinggang¹, LIU Yuan¹, GAO Shan¹, CHEN Xi²

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: The safe and reliable operation of high-voltage circuit breaker is of great significance. In this paper, the survey of mechanical fault types and fault reasons of high-voltage circuit breaker is introduced. Then the mechanical fault diagnosis methods of high-voltage circuit breaker are discussed. Furthermore, the deep analyses are carried out on the mechanical fault characteristic quantity extraction and mechanical fault identification method. According to the development of high-voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis methods, the key problems and development tendency are pointed out.

Key words: circuit breaker; mechanical characteristics; fault diagnosis; characteristic quantity extraction; fault identification