

灵绍±800 kV 特高压直流协调频率控制功能应用

刘 凯, 张庆武, 侍乔明

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:区域电网频率控制系统在应对多直流馈入引发电网频率稳定问题中发挥着重要作用,频率控制系统动作的快速性、准确性很大程度依赖于直流协调控制功能。介绍了直流控制系统与频率控制系统的接口方式,设计了合理的接口数据处理方法。针对频率控制系统存在无法准确判别直流功率回降量的问题,提出了直流功率损失判断准确性提升方法。为改善直流执行频率控制系统调制命令的准确性和可靠性,提出了调制功率补偿方法和换相失败延时调制方法。最后通过实时数字仿真(RTDS)验证了所提方法的正确性和有效性,为后续特高压直流协调控制功能的应用提供了参考。

关键词:特高压直流;协调控制;调制功率补偿;换相失败

中图分类号:TM723

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)04-0014-07

0 引言

灵州—绍兴±800 kV 特高压直流输电工程(以下简称灵绍直流)额定电压±800 kV,直流线路长度1720 km,直流输送容量8000 MW。受端绍兴换流站所在的华东电网随着复奉、锦苏、宾金三大特高压直流的先后接入,在提升电网接入容量的同时,也增加了单一或多回特高压直流大功率失去时,安全稳定装置动作切除大量负荷导致的频率崩溃,引发大面积停电事故的风险^[1-4]。为应对这一问题,华东电网引入了频率紧急协调控制系统(FECCS,简称“频率控制系统”)。频率控制系统通过利用多直流功率支援、联切抽蓄电站机组以及快速切负荷等措施来维持电网的频率稳定^[5]。灵绍直流作为该系统主要组成部分,承担当华东电网其他直流闭锁后紧急提供功率支援的重要作用。

直流与频率控制系统的协调控制功能包括:(1)直流向频率控制系统准确提供自身状态信息以利于频率控制系统判定直流损失;(2)直流精确执行频率控制系统命令以保证电网频率稳定效果。

目前关于大容量直流馈入后区域电网安全稳定研究较多,集中在交直流系统协调控制方法及运行特性分析^[6-8]以及从安全稳定控制系统的角度分析讨论安控策略和应用中存在的问题^[9-13];但涉及直流同时作为电网中功率损失对象和功率调制对象面临的问题及解决方法研究较少,文献[14]研究了交直流互联电网直流功率调制相关问题,分析了部分参数优化对直流调制的影响,但缺乏从实际工

程应用的角度解决问题。

本文围绕直流协调控制功能介绍了直流控制系统与频率控制系统的接口方式,为改善频率控制系统动作的快速性、准确性,提出了直流功率损失判断准确性提升方法、调制功率补偿方法和换相失败延时调制功能,并通过实时数字仿真平台(RTDS)验证了上述直流协调控制功能的正确性。

1 直流控制与频率控制系统接口

早期直流与频率控制系统接口一般采用基于“硬接点”开关量方式,例如频率控制系统向直流发送功率调制命令、直流向频率控制系统反馈自身运行功率大小均以档位(开关量)进行交互,档位数量直接限制了调节的精度。后期直流工程中陆续出现采用4~20 mA小电流量来表征直流与频率控制系统交换的信号,但其采样精度仍然会受到传感器硬件带来的影响。特高压直流容量大,运行方式多,如果采用传统接口将无法满足不同精度要求。连接方便,传输数据量大,可靠性高,通道状态易监视等优点的光纤通信方式成为特高压直流与频率控制系统接口的首选。灵绍直流极控制主机(PCP)与频率控制系统的接口方案如图1所示,直流控制系统配置方式为主备冗余,频率控制系统配置方式为双重化冗余。直流控制与频率控制系统之间采用交叉连接方式。图1中FECCS A/B表示两套频率控制系统,PCP1 A/B、PCP2 A/B则分别表示直流极1、极2各两套极控制主机。

直流控制与频率控制系统之间数据存在双向交互,频率控制系统向直流控制发送数据主要包括

收稿日期:2018-03-13;修回日期:2018-04-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900602)

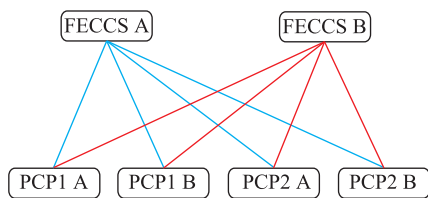


图 1 直流控制与频率控制系统接口

Fig.1 Interface between PCP and FECCS

提升直流命令、提升直流容量、提升直流标志位、频率控制收直流信息异常等;直流控制向频率控制系统发送数据主要包括直流最大可提升容量、直流可调制标志信号、直流极控模式、直流功率速降信号、直流功率速降量、直流功率速降标识位、非正常停运信号、最大可输送功率、校验码等。

直流控制接收频率控制命令的处理方法如图 2 所示。直流控制同时接收两套频率控制系统提升直流的命令,任一动作直流均做响应,优先执行先收到的提升命令;当直流控制在同一执行周期同时接收到两套命令时执行 A 套提升指令。

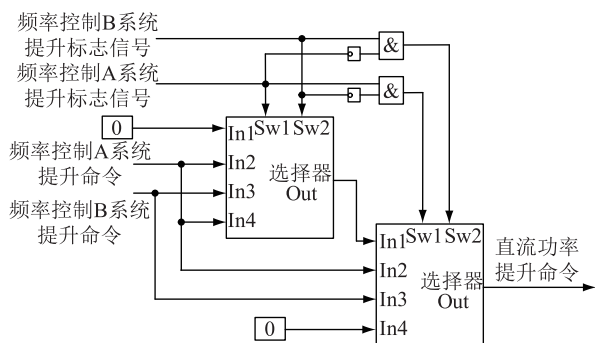


图 2 频率控制系统调制命令选择方法

Fig.2 Method of choosing orders from FECCS

直流控制发送到频率控制系统的信号可以分为两类,一类是直流极 1 或极 2 自身的运行状态、运行模式、故障信息等,另一类是直流双极作为一个整体表现出的电气特征如直流最大可提升容量、直流可调制标志信号。为保证发送数据的可靠性,确保直流控制处于值班状态的主机发送实时数据并对非值班系统的发送数据进行清零。直流最大可提升容量计算公式参见式(1),根据当前直流电压与直流最大过负荷能力下的电流水平计算出本极直流最大运行功率,通过直流极间通信获取另一极运行功率从而得到最终双极的直流可提升容量。

$$\begin{cases} P_{p1max} = I_{p1oll} U_{p1mea} \\ P_{p2max} = I_{p2oll} U_{p2mea} \\ P_{Bip} = I_{p1mea} U_{p1mea} + I_{p2mea} U_{p2mea} \\ P_{sscsmax} = P_{p1max} + P_{p2max} - P_{Bip} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: I_{p1oll} , I_{p2oll} 为极 1、极 2 计及直流过负荷能

力的电流指令值; U_{p1mea} , U_{p2mea} 为受端极 1、极 2 直流电压测量值; I_{p1mea} , I_{p2mea} 为受端极 1、极 2 直流电流测量值; P_{p1max} , P_{p2max} 为受端极 1、极 2 最大运行功率; P_{Bip} 为受端直流双极实时总功率; $P_{sscsmax}$ 为直流当前运行状态下最大可提升功率。

直流最大可提升容量及直流可调制标志信号直接影响频率控制系统对直流可调制状况的判断,当直流可调制标志信号为 1 时表明直流当前具备接受频率控制系统调制的能力。当直流可调制信号为 0 时,限制直流最大可提升容量为 0。在获取直流最大可提升容量及直流可调制标志信号过程中,需要充分考虑直流运行工况对两个信号形成的影响,其主要影响因素包括站间通信故障、极间通信故障、直流线路故障、安控动作以及直流功率回降。直流可调制信号的形成逻辑示意图如图 3 所示。展宽 1 设置为 500 ms 可以有效避免常见通信故障抖动带来的不利影响,展宽 2 设置为 5 s 涵盖了线路故障去游离及再启动时间,展宽 3 设置为 60 s 缓解直流连续调制对电网系统的产生的冲击。

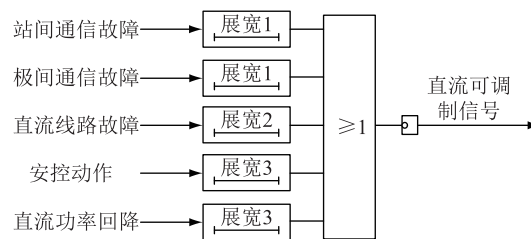


图 3 直流可调制信号示意

Fig.3 Schematic diagram of DC modulation available signal

2 直流功率损失判断准确性提升方法

直流在运行过程中会受到诸多因素的影响,导致直流功率回降。常见的因素包括:无功控制绝对最小滤波器不满足、特定直流保护动作(如过流保护、谐波保护)、换流阀结温过高、阀冷却系统回降请求等。直流功率回降的目的是保证设备的安全和系统的可靠运行。当直流出现功率回降后,频率控制系统单纯依靠自身无法快速、准确判断直流功率损失量,产生这一问题主要原因有:(1) 频率控制系统通过采集换流变网侧电压电流计算得出当前直流功率,但无法准确捕获突变时刻进而锁存直流回降前功率;(2) 导致直流功率回降的因素较多,不同因素触发的直流回降的速率也不尽相同。当回降速率过慢时,频率控制系统无法及时判定回降完成时刻以锁存回降后功率。虽然频率控制系统可以通过延时的方法锁存准确的回降后功率,但动作

的时效性将因此降低。

针对上述问题的解决思路为:直流功率回降由直流控制系统判别,直流控制系统通过调整不同类型功率回降的速率使其适应频率控制系统的快速性要求,同时在满足特定触发条件后向频率控制系统发送功率速降信息。触发条件包括:(1)绝对最小滤波器不满足、接地极线过负荷保护或极平衡保护导致直流功率速降;(2)直流功率速降量大于门槛值,门槛值的设定需要结合直流输送容量以及受端交流系统的强弱程度综合考虑,灵绍直流门槛值设置为 200 MW。具体的直流功率速降策略实现时序如下图 4 所示。

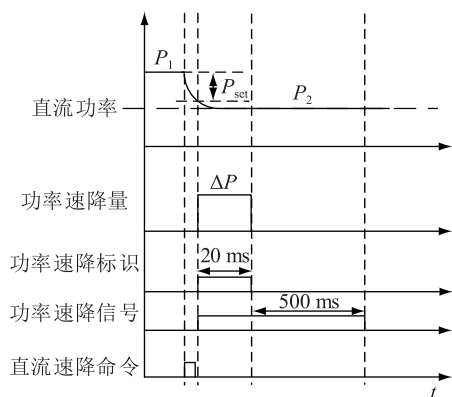


图 4 直流功率速降时序

Fig. 4 Fast rundown sequence of DC power

图 4 中 P_1 为直流功率损失判断准确性提升方法前双极总功率, P_2 为直流功率损失判断准确性提升方法完成后双极总功率, ΔP 为直流功率速降量, P_{set} 为触发功率速降信号及功率速降量生成的功率门槛。假设直流由于绝对最小滤波器不满足导致直流功率回降,当直流功率回降到 $P_1 - P_{set}$ 功率点后触发功率速降标识、功率速降信号以及功率速降量形成并发送到频率控制系统;根据直流控制与频率控制系统的接口协议,功率速降标识固定为 20 ms 脉冲信号,功率速降信号在功率速降标志消失后展宽 500 ms。频率控制系统收到直流功率速降信息后结合换流变网侧电流或功率突变量条件、功率速降量大小进行综合判断。

后续仿真试验证明通过实施上述直流功率损失判断准确性提升方法可以有效提升频率控制系统对于直流功率损失判断的准确性。

3 调制功率补偿方法

在直流工程中,直流输送功率一般指整流侧直流功率;当直流工作在定功率模式下时,直流控制系统通过控制器调节保证整流侧直流功率实测值

和直流功率指令值相一致。但由于直流线路损耗的存在,逆变侧直流功率与整流侧直流功率之间存在功率差额,功率差额大小随着直流电流的增加而非线性增加。忽略线路电阻寄生电感及杂散电容的影响,直流稳态运行时,整流侧与逆变侧功率存在如下关系:

$$P_{RECT} = P_{INV} + I^2 R \quad (2)$$

式(2)中: P_{RECT} 为整流侧直流功率; P_{INV} 为逆变侧直流功率; I 为直流电流; R 为直流线路电阻。

通常,逆变侧安控系统调制直流的主要实现方法为:逆变侧直流控制系统接收安控系统的调制指令,然后通过站间通信发送到整流侧,整流侧直流控制系统根据逆变侧发过来的调制指令进行调节。

上述方法设计思路简单,信号传输中间环节少,稳定可靠,已在诸多直流工程中得到广泛应用。但实际工程中,由于安控调制指令是基于逆变侧直流功率计算得到,而安控的目标在于调制逆变侧直流功率到指定值,如果直接发送到整流侧执行,由公式(2)中两侧功率关系可知,逆变侧实际提升功率将小于目标提升功率。

以灵绍直流为例,直流在不同功率和不同调制功率水平通过 RTDS 仿真得到的调制功率误差如图 5 所示。调制误差为逆变侧目标提升功率和直流实际提升功率的差值与目标提升功率的比值。由图 5 可看出,逆变侧功率调制在整流侧执行所产生的调制功率误差在相同调制功率水平与直流功率大小正相关,在相同直流功率水平与调制功率正相关,调制功率误差在极端工况下甚至可以达到 7%。

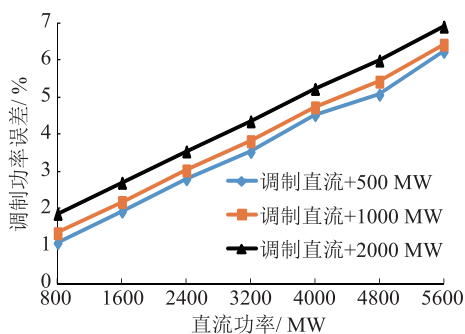


图 5 调制误差与直流功率、调制功率关系

Fig.5 Relationship between modulation error and DC power, modulation power

单一直流调制精度较低一般不会对较强交流电网产生较大影响,但对于多直流大容量接入的华东电网而言,将会产生更大的调制功率误差,影响频率控制系统的电网频率稳定调节效果,给电网的安全运行带来不利影响。

由于直流功率提升引起线路损耗的变化是造

成调制功率误差的主要原因,因此考虑通过在频率控制系统发送到直流系统的调制功率指令上叠加功率补偿量的方法减小调制误差。功率提升后的直流电流大小可以通过联立式(3)中方程求解:

$$\begin{cases} U_{RECT} = U_{1 NV1} + I_1 R \\ U_{RECT} = U_{INV2} + I_2 R \\ P_{TZ_REF} = P_{INV2} - P_{INV1} \\ P_{INV1} = I_1 U_{1 NV1} \\ P_{INV2} = I_2 U_{1 NV2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{INV1} , P_{INV2} 为直流功率提升前、后逆变侧直流功率; I_1 , I_2 为直流功率提升前、后直流电流; U_{RECT} 为整流侧直流额定电压; U_{INV1} , U_{INV2} 为直流功率提升前、后逆变侧直流电压; R 为直流线路电阻; P_{TZ_REF} 为逆变侧调制功率指令值; P_{TZ_RECT} 为经过功率补偿后整流侧调制功率指令值; P_{COMP} 为功率补偿量。

经过对式(3)求解,可得到提升后的直流电流 I_2 的表达式为:

$$I_2 = \frac{U_{RECT} - \sqrt{U_{RECT}^2 - 4R(P_{TZ_REF} + U_{INV1}I_1)}}{2R} \quad (4)$$

将 I_2 代入式(5)可计算得到 P_{COMP} 为:

$$P_{COMP} = I_2^2 R - I_1^2 R \quad (5)$$

将上述计算方法得到的功率补偿量叠加到逆变侧频率控制系统提供的调制功率指令值上,可得到整流侧最终调制功率指令 P_{TZ_RECT} , 其表达式为:

$$P_{TZ_RECT} = P_{TZ_REF} + P_{COMP} \quad (6)$$

此时,基于整流侧的调制功率指令和当前功率指令值计算可得整流侧最终的功率指令值:

$$P_{RECT2} = P_{RECT1} + P_{TZ_RECT} \quad (7)$$

式中: P_{RECT1} 和 P_{RECT2} 分别为直流功率提升前、后整流侧直流功率指令。

同样通过灵绍直流 RTDS 仿真得到,当逆变侧调制功率指令 P_{TZ_REF} 为+1000 MW 时,调制功率补偿前后的调制功率误差如图 6 所示。经功率补偿后,随着直流功率的增大逆变侧的调制功率误差始终保持在 1% 左右,有效提高了频率控制系统调制直流功率的精确性。

4 换相失败延时调制

换相失败为直流运行中常见的故障现象,换相失败出现后会引引起直流电压的下降、直流电流的上升,直流功率的振荡^[15-19]。引起直流系统换相失败的原因包括电网侧交流故障、阀误触发和阀丢脉冲等^[20]。通常单次换相失败一般可随着故障原因的

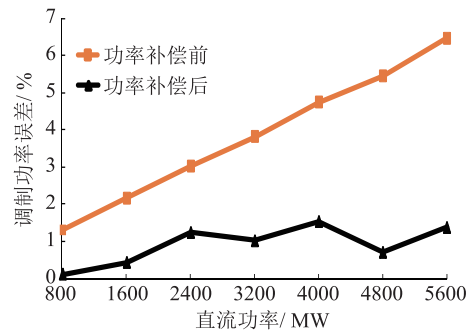


图 6 功率补偿前后对比

Fig.6 Comparison of before and after power compensation

消失自行恢复,连续换相失败则可能导致直流闭锁。

在换相失败过程中,如果直流收到频率控制系统的功率提升命令,此时直接提升功率将会引起直流电流增大,叠弧时间变长,熄弧角进一步减小,延缓换相失败恢复甚至会导致连续换相失败进而给直流运行、电网安全带来不利影响。

为应对上述问题,提出并采用换相失败延时调制方法,即在换相失败过程中接收到频率控制系统命令后暂停执行,等待换相失败消失、直流运行稳定后再补充执行。实现该功能的逻辑框图如图 7 所示,具体步骤如下:

- (1) 判别换相失败过程中是否出现频率控制系统调制直流的命令;
- (2) 锁存换相失败过程中来自频率控制系统的提升命令并封锁功率提升出口;
- (3) 检测换相失败标志是否复归,确认复归后展宽 1 s 待直流恢复稳定运行后释放锁存的提升命令,开放功率提升出口提升直流功率。

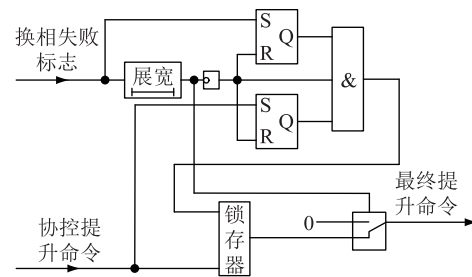


图 7 换相失败延时调制逻辑

Fig.7 Logic diagram of commutation failure delay modulation

通过图 7 所示的逻辑处理,实现了换相失败发生时时刻锁存频率控制系统调制命令、封锁出口,换相失败消失、直流运行恢复稳定后再执行的功能。

5 仿真实证

基于 PCS 9550 特高压直流控制保护系统、PCS

992 频率控制系统及 RTDS 系统,搭建特高压直流半实物仿真平台,对本文所提的功率速降策略、调制功率补偿方法以及换相失败延时调制的功能进行试验验证。试验系统中,直流控制保护核心程序与灵绍直流工程现场一致,RTDS 中直流系统模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
灵州侧交流电压/kV	765	直流额定功率/MW	8000
绍兴侧交流电压/kV	510	直流额定电压/kV	800
灵州侧交流系统短路容量/kA	30	直流额定电流/kA	5
绍兴侧交流系统短路容量/kA	35	直流线路电阻/ Ω	6.66

5.1 绝对最小滤波器不满足功率速降

受端双极四阀组直流功率 P 全压 5500 MW 运行,通过软件程序置数方法模拟受端直流控制系统切除多组 HP 12/24 型交流滤波器,促使直流系统因绝对最小滤波器不满足而启动功率速降,回降功率指令由无功控制计算得到,为 2400 MW。功率速降试验波形如图 8 所示,实际直流功率由 5500 MW 回降至 3 101.4 MW;无功控制功率回降命令 Y 、功率速降量 P_1 、功率速降标识信号 X 生成时序与设计一致。相同试验工况下,与不采用直流功率速降策略试验结果对比如表 2 所示。定义直流发生功率速降的时刻为初始时刻。采用常规功率回降策略,频率控制系统无法启动、识别出直流功率损失;而采用直流功率损失判断准确性提升方法可以保证频率控制系统短时间识别出直流功率损失。

表 2 频率控制系统常规功率回降与速降策略试验结果对比

Tab.2 Comparison between normal rundown and fast rundown of DC power

项目	常规功率回降策略	直流功率速降策略
无功回降速率/(MW·min ⁻¹)	4000	7 500 000
启动时间/ms	不启动	10
判定流功率损失/MW	无法判定	2 398.6

5.2 频率控制系统命令功率提升

通过修改频率控制系统主机 PCS 992 试验定值,模拟频率控制系统向直流发出提升 1000 MW 调制功率指令 $P_{原}$ 。提升试验波形如图 9 所示,提升前直流双极全压四阀组 4000 MW 运行,受端直流功率 P' 为 3921 MW,调制功率指令经过补偿修正为 $P_{补}$ 1053 MW;提升后受端直流功率为 4926 MW,实际提升 1005 MW。经过补偿后调制功率误差仅为 0.5%,验证了调制功率补偿功能的正确性。

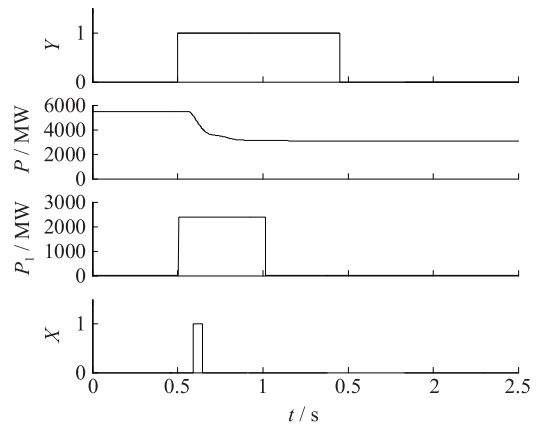


图 8 直流功率速降波形

Fig.8 Waveform of fast rundown of DC power

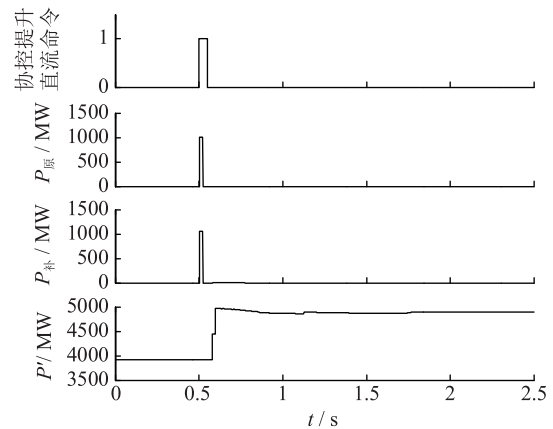


图 9 频率控制系统提升直流波形

Fig.9 Waveform of DC power runup by FECCS

5.3 换相失败过程中功率提升

在 RTDS 中模拟受端交流电网 A 相金属性接地故障 300 ms,同时通过频率控制系统主机 PCS 992 向直流模拟发送提升 1000 MW 功率调制功率指令。试验波形如图 10 所示。

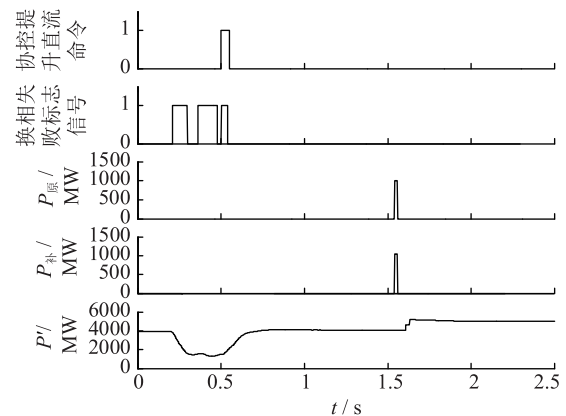


图 10 换相失败延时调制波形

Fig.10 Waveform of delay modulation of commutation failure

交流故障导致直流出现连续换相失败,在发生

第三次换相失败同时接收到频率控制系统调制命令。交流故障恢复、换相失败消失 1 s 后,换相失败延时调制功能释放锁存的调制命令,试验结果验证了延时调制功能的正确性。

6 结语

直流作为频率控制系统的重要组成部分,应充分重视其对频率控制系统控制效果的影响。直流协调控制功能一方面负责向频率控制系统快速准确反馈包含直流功率损失在内的自身状态变化信息,另一方面承担精确执行频率控制系统调制命令的任务。两方面都直接影响到频率控制系统最终的调节效果。

本文围绕直流协调控制功能介绍了直流控制与频率控制系统接口方式,提出了直流功率速降策略、调制功率补偿方法和换相失败延时调制方法,从而为频率控制系统的快速、准确动作提供了支撑,改善了电网频率稳定控制效果。

灵绍直流协调控制功能作为华东频率控制系统中重要组成部分,已正式投入运行。随着国家对于特高压直流的持续建设,将有更多区域电网利用频率控制系统应对大容量多直流馈入引发的电网安全稳定问题。如何根据分层接入特高压直流的特点设计适应于不同电网间调制功率协调策略是直流协调控制功能后续研究的重点。

参考文献:

- [1] 李兆伟,翟海保,刘福锁,等. 华东大受端电网直流接入能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 147-152.
LI ZhaoWei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability evaluation for East China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 147-152.
- [2] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI ZhaoWei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China Grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [3] 高 强,张小聪,施正钊,等. ±800 kV 宾金直流双极闭锁故障对浙江电网的影响[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 47-51.
GAO Qiang, ZHANG Xiaocong, SHI Zhengchai, et al. Impact of ±800 kV Yibin-Jinhua DC bipolar block fault on Zhejiang Power Grid [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 47-51.
- [4] 林章岁,张林垚. 特高压电网对福建电网安全稳定影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2008(7): 19-23.

- LI Zhangsui, ZHANG Linyao. Influences of the ultra high voltage grid on security and stability of Fujian Power System [J]. Power System and Clean Energy, 2008(7): 19-23.
- [5] 李虎成,袁宇波,张小易,等. 面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 24-29.
LI Hucheng, YUAN Yubo, ZHANG Xiaoyi, et al. The frequency emergency control characteristic analysis for UHV AC/DC large receiving end power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 24-29.
- [6] 邵德军,徐友平,赵 兵,等. 交直流柔性协调控制技术在华中电网的应用[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1146-1151.
SHAO Dejun, XU Youping, ZHAO Bing, et al. Application of flexible coordinated AC/DC control technology in Central-China Power Grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1146-1151.
- [7] 徐式蕴,吴 萍,赵 兵,等. 哈郑直流受端华中电网基于响应的交直流协调控制措施[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1773-1778.
XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Hami to Zhengzhou[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1773-1778.
- [8] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [9] 张志强,袁荣湘,徐友平,等. 适应多回特高压直流的四川电网高频切机优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 141-146.
ZHANG Zhiqiang, YUAN Rongxiang, XU Youping, et al. Optimizatin of over frequency-tripping scheme in Sichuan[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 45-50.
- [10] 方勇杰. 跨区互联电网紧急控制技术未来发展分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 1-5.
FANG Yongjie. Analysis on trends in emergency control technology of cross-regional interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 1-5.
- [11] 李德胜,罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 151-157.
LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.
- [12] 许 涛,励 刚,于 钊,等. 多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 98-104.
XU Tao, LI Gang, YU Zhao, et al. Design and application of emergency coordination control system for multi-feeed HVDC receiving-end system coping with frequency stability problem [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 41(8): 98-104.

- [13] 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.
LIANG Shaohua, XIA Shangxue, HUO Chao, et al. Interface and coordination control method between Qinghai-Tibet DC stability control system and pole control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 125-128.
- [14] 谢惠藩, 张尧, 夏成军, 等. 交直流互联电网直流功率调制相关问题[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 43-50.
XIE Huifan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Issues related to DC power modulation in AC/DC hybrid system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 43-50.
- [15] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [16] 陶瑜. 直流输电控制保护系统分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
TAO Yu. Analysis and application of DC transmission control protection system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [17] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
LI Xingyuan. Operation and control of HVDC transmission system [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [18] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [19] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automation recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140.
- [20] 周前, 张潮, 张宇宇, 等. 2018年多直流馈入江苏规划电网连锁换相失败分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 51-57.
ZHOU Qian, ZHANG Chao, ZHANG Ningyu, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC system in planning Power Grid of Jiangsu in 2018 [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 51-57.

作者简介:



刘凯

刘凯(1986—),男,硕士,工程师,从事特高压直流输电控制保护技术研究工作(E-mail:liukai@nrec.com);

张庆武(1982—),男,博士,研究员级高级工程师,从事特高压直流输电控制保护技术研究工作(E-mail:zhangqw@nrec.com);

侍乔明(1989—),男,博士,工程师,从事特高压直流输电控制保护技术研究工作。

Application of Coordinated Frequency Control Function in Lingshao ± 800 kV UHVDC Project

LIU Kai, ZHANG Qingwu, SHI Qiaoming
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The frequency emergency coordination control system plays an important role in dealing with the frequency stability problem of power systems caused by multi-infeed HVDC systems. However, the rapidity and accuracy of the coordinated control system largely depends on the DC coordinated control function. Firstly this paper introduced the interface between DC control system and coordinated control system, and interface data processing method was appropriately designed. Then a new DC power fast decreasing control method was proposed to solve the problem that the coordinated control system cannot distinguish the decrease of DC power under the current control method. A modulation power compensation method and a commutation failure delay modulation method were also proposed to improve the accuracy and reliability during the implementation of modulation control. Finally, the correctness of the functions was verified by RTDS simulation test, which provides reference for the application of the UHVDC coordinated control function.

Key words: UHVDC; coordinated control; modulation power compensation; commutation failure

(编辑 陈娜)