

# 云南电网和主网利用直流输电系统黑启动的策略研究

赵睿<sup>1</sup>, 卢斯煜<sup>1</sup>, 王曦<sup>2</sup>, 柳勇军<sup>1</sup>, 涂亮<sup>1</sup>, 李保宏<sup>3</sup>

(1. 南方电网科学研究院 广东 广州 510000; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;  
3. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

**摘要:** 云南与主网异步联网后, 启动溪洛渡直流和鲁西背靠背直流参与初期黑启动可加快电网恢复速度。通过对传统直流参与黑启动时的交流系统短路容量、转动惯量要求以及直流系统控制模式选择的研究, 确定了传统直流参与交流系统黑启动的技术条件。同时, 以柔性直流作为试点研究对象, 开展基于模块化多电平换流器(MMC)的新型直流参与交流系统黑启动的启动策略研究, 提出分组分时序的负载投入方法。利用 PSCAD 电磁暂态模型进行仿真, 结果验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 传统直流; 柔性直流; 黑启动; 系统恢复

**Abstract:** When Yunnan power grid is in asynchronous operation with main Southern Power Grid, Xiluodu and Luxi HVDC can be started at the initial stage of black-start to speed up the recovery of power grid. The control modes of the traditional HVDC and the technical requirements of AC system for involving in the black-start are researched to set its technical conditions. At the same time, a new black-start strategy is researched when HVDC transmission system based on modular multilevel converter (MMC) is used in grid black-start. The simulation results with PSCAD electromagnetic transient model verify the correctness of the theoretical analysis.

**Key words:** traditional HVDC; HVDC flexible; black-start; system recovery

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)05-0026-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.05.006

## 0 引言

南方电网是目前世界上最复杂的交直流混联网之一。由于大容量远距离送电、多回直流馈入点电气距离较近等原因, 南方电网在发生多回直流同时闭锁等严重情况时, 存在电网崩溃引发大面积停电事故的风险。一旦发生大面积停电事故, 尽快恢复网架和供电是第一要务<sup>[1-2]</sup>。

传统直流输电系统输送功率大、启动和调整速度快、可控性强, 在黑启动及系统恢复过程中都可发挥较大作用; 并且, 鲁西背靠背直流存在基于 MMC 的柔性直流单元, 这种新型直流系统能够自换相, 可以工作在无源逆变方式, 不需要外加的换相电压, 受端系统可以是无源网络, 克服了传统直流输电受端必须是有源网络的根本缺陷, 在电网黑启动阶段初期可加快系统的恢复速度<sup>[3-4]</sup>。但是, 直流输电对电网黑启动和系统恢复的不利影响也很明显, 特别是直流启动对交流系统的冲击较大, 系统恢复过程

中直流发生闭锁可能导致交流系统崩溃; 同时还存在系统严重故障导致直流输电设备损害的风险。另外, 鲁西背靠背直流的柔性直流单元属于基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统(MMC-HVDC), 用于电网黑启动时, 需要重视换流站子模块电容的充电。因此, 研究传统和基于 MMC 的新型直流输电系统黑启动的相关问题, 对于直流输电系统数量多、容量大的南方电网, 有非常重大的意义。

这里基于南方电网 2016 年运行方式中的直调系统网架, 主要以传统直流和基于 MMC 的新型直流来开展相应的直流系统黑启动策略研究, 提出传统直流启动时交流系统强度要求、启动控制模式, 以及 MMC-HVDC 系统换流站黑启动策略。

## 1 传统直流黑启动条件

### 1.1 传统直流启动时的交流系统强度要求

直流启动时的滤波器投入是对交流系统的无功冲击,直流功率的迅速提升是对交流系统的有功冲击。如果交流系统无法承受这两种冲击,引起电压和频率大幅变化,将可能导致直流系统保护或交流系统保护动作,使得启动无法成功。此外,如果交流系统过于薄弱,直流输电系统的电流、电压建立过程也将面临困难,造成直流无法达到稳定的运行状态,导致直流启动的失败。因此,交流系统必须具备一定的强度,才能承受直流系统启动造成的冲击,并保证直流系统能够建立平稳的运行状态,即保证启动的成功<sup>[5-7]</sup>。

### 1) 短路容量要求

黑启动时尽快启动直流有利于系统快速恢复,但这对交流系统的最小强度提出要求。一般来说,在黑启动条件下,直流启动过程中暂态工频过电压不超过额定值的 1.4 倍,稳态工频电压值不超过额定值的 1.1 倍。

由于直流以最小功率启动时消耗无功较少,因此直流启动时投入的最小滤波器组会反送无功,造成交流电压升高。直流功率建立时投入最小滤波器组合 2 组,则滤波器向交流系统反送的无功功率为  $Q_f$ 。而在最小启动功率(单极 70% 降压,最小电流 0.1 p. u.) 运行时,直流系统吸收的无功功率  $Q_{dc} \approx P_{dc} = 0.07P_{dn}$ ,其中  $P_{dn}$  为直流单极额定功率。同时电压升高的幅值可用式(1)进行估算:

$$S_{sc} = \frac{U}{\Delta U} Q \quad (1)$$

式中:  $U$  为滤波器投入启动前的电压;  $\Delta U$  为电压升高幅值;  $S_{sc}$  为换流母线的短路容量。

溪洛渡直流工程中整流侧  $P_{dn} = 10Q_f$ ,则为满足稳定电压不超过  $1.1U_N$  的要求,有

$$S_{sc} = \frac{1.0}{0.1} (2Q_f - 0.7Q_f) = 13Q_f \quad (2)$$

即若投入 2 组滤波器,送端短路容量需要为单组滤波器容量的 13 倍左右。

溪洛渡直流工程中逆变侧  $P_{dn} = 9Q_f$ ,则为满足稳定电压不超过  $1.1U_N$  的要求,有

$$S_{sc} = \frac{1.0}{0.1} (2Q_f - 0.63Q_f) = 13.7Q_f \quad (3)$$

即若投入 2 组滤波器,受端短路容量需要为单组滤波器容量的 13.7 倍左右。

### 2) 转动惯量要求

交流系统维持要求频率的能力与其系统转动惯量有关,为衡量黑启动条件下,直流功率与系统转动惯量之间的相对关系,定义了相应的直流系统有效惯性时间常数  $H_{dc}$ 。

$$H_{dc} = \frac{\text{交流系统总转动惯量}}{\text{直流系统当前输送的功率}} \quad (4)$$

在启动过程中,对整流侧,直流功率相当于固定负荷;对逆变侧,直流功率则相当于一台固定出力的机组;因此,直流启动会造成整流侧频率降低,逆变侧频率升高。

负荷的频率效应及调速器的作用共同决定了频率的变化。随着频率的升高和降低,负荷吸收的功率会降低或升高,调速器也会通过加大或减少阀门开度,增加或减少发电机出力,以阻止频率的改变。

设直流功率为  $P_d$ ,机组的总容量为  $P_C$ ,则

$$\frac{P_d}{P_C} = K \frac{\Delta f}{f_n} \quad (5)$$

在南方电网中,取综合频率因子  $K = 3.0$ ,将频率变化范围限定在 2.5 Hz,则机组容量需要为直流输送功率的 6.7 倍,如果送端系统无负荷,受端系统无火电机组,有效惯性时间常数只需要达到 28。

### 1.2 传统直流启动整流侧控制模式选择

黑启动时选择合适的直流控制模式可以提高系统稳定性<sup>[8]</sup>。

对于弱交流系统而言,受端电压稳定是保证直流正常运行的重要因素。由于电压和有功弱耦合和无功强耦合,因此通过分析直流系统换流器控制模式对逆变侧消耗无功功率的影响可以定性判断电网电压的稳定性。直流运行时逆变侧电压、有功及无功可由式(6)~式(8)表示。

$$U_{di} = U_{doi} \cos \gamma_i - \frac{3BX_i I_{di}}{\pi} \quad (6)$$

$$= 1.35E_{LL}BT_i \cos \gamma_i - \frac{3BX_i I_{di}}{\pi}$$

$$P_{dc} = 1.35E_{LL}BT_i \cos \gamma_i I_{di} - \frac{3BX_i I_{di}^2}{\pi} \quad (7)$$

$$Q_{dc} = P_{dc} \tan \phi \quad (8)$$

式中:  $P_{dc}$  为逆变侧直流外送有功功率;  $U_{di}$  与  $I_{di}$  为逆变侧直流电压与电流;  $U_{doi}$  为逆变侧理想空载直流电压;  $\gamma_i$  为逆变侧熄弧角;  $E_{LL}$  为变压器线电压有效值

(一次侧);  $B$  为桥数;  $X_i$  为变压器折算到二次侧的阻抗;  $T_i$  为变压器变比;  $\phi = \arccos(U_{di}/U_{doi})$ 。

1) 整流侧定功率逆变侧定电压控制

当直流采用整流侧定电流、逆变侧定电压控制方式时,  $U_{di}$  不变,  $I_{di}$  不变。则逆变侧电压  $E_{LL}$  下降时,  $U_{doi} = 1.35E_{LL}BT_i$  减小且  $U_{di}$  不变,  $\cos\phi$  增大,  $\tan\phi$  减小, 且  $Q_{dci} = P_{dci}\tan\phi = U_{di}I_{di}\tan\phi$ , 故  $E_{LL}$  下降时  $P_{dci}$  不变,  $\gamma_i$  减小,  $Q_{dci}$  减小。即在保证直流逆变侧外送有功的同时消耗无功减小, 有利于换流母线电压的恢复。

2) 整流侧定电流逆变侧定电压控制

采用整流侧定功率、逆变侧定电压控制方式时,  $U_{di}$  不变,  $P_{dcr}$  不变。

由于

$$I_{di} = \frac{-U_{di} + \sqrt{U_{di}^2 + 4R_L P_{dcr}}}{2R_L} \quad (9)$$

$$P_{dci} = U_{di}I_{di} \quad (10)$$

则  $P_{dci}$  不变。

逆变侧电压  $E_{LL}$  下降时,  $U_{doi}$  减小,  $\tan\phi$  减小,  $\gamma_i$  减小,  $Q_{dci}$  减小。直流有功无功变化情况同整流侧定电流、逆变侧定电压控制模式相同, 即在保证直流逆变侧外送有功的同时消耗无功减小, 有利于换流母线电压的恢复。

## 2 基于 MMC 的新型直流黑启动策略

对于两端 MMC-HVDC 系统, 一端由于故障发生大停电后, 另一端换流站也将停运。在这种情况下, 停电端没有交流电源对子模块电容充电, 因此需要有源端交流电源同时向两端换流站充电, 其黑启动策略同样适用于供电无源网络时的换流站启动。这时的充电等效电路如图 1 所示。

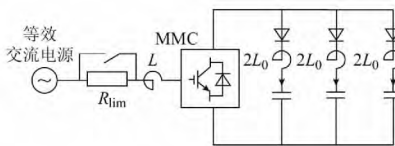


图 1 两端系统中黑启动换流站时的等效电路

此时, 无源端上、下桥臂电流大小相等、方向相同, 因此 2 个桥臂电容同时充电。若无源侧换流站闭锁全部子模块, 则最终的结果是只能使子模块充电到额定电压值的一半, 无法完成换流站的启动。

换流站启动步骤如下:

- 1) 启动有源侧换流站的同时闭合直流线路隔离刀闸, 同时向无源侧换流站充电;
- 2) 在电容充电过程中, 子模块控制器(SMC)的取能采用自取能方式, 则在全站闭锁充电至 SMC 达到其工作电压后再进行排序触发, 将每相 2 个桥臂  $2N$  个子模块电容电压以给定的轮换周期  $T$  进行排序, 选出电容电压最小的  $N$  个子模块闭锁, 其余子模块触发  $T/2$ ;
- 3) 有源侧定直流电压控制阶段;
- 4) 有源侧和无源侧电压建立;
- 5) 接入无源负载, 提升功率。

在功率提升阶段, 由于无源网络没有独立的交流电源维持系统的频率, 因此需要 MMC 对系统的交流电压有效值和频率进行控制, 其电压参考值可以采用图 2 的方法产生。其中  $u_{rmsref}$ 、 $u_{rms}$  分别为滤波器母线交流电压有效值的指令值和测量值。频率信号  $\omega = 2\pi f$ 。控制器输出参考电压指令  $v_{iref}$  ( $i = a, b, c$ ) 传送到 PWM 触发单元。ramp 环节使交流电压指令以恒定速度从 0 逐步上升到设定值<sup>[9-10]</sup>。

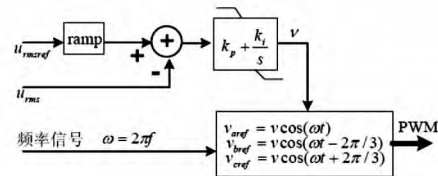


图 2 无源侧交流电压控制器

为避免无源负载投入对交流系统频率和电压造成的冲击, 应采用分组分时序的方法投入负载。

## 3 仿真分析

### 3.1 黑启动条件下溪洛渡直流逆变侧最小启动条件

溪洛渡直流的整流站位于云南电网内部, 云南电网和南方电网异步, 两大电网同时发生大停电事故的概率较小, 因此, 在南方电网主网黑启动时, 可以认为溪洛渡直流整流站的交流系统为强系统。

溪洛渡直流单极 70% 降压启动, 启动的直流功率为 112 MW (不考虑直流线路的损耗), 单组滤波器的容量为 174 Mvar, 因此, 逆变侧最小启动条件如下:

- 1) 短路容量需超过  $13.7 \times 174 \text{ MVA} = 2384$

MVA;

2) 考虑参与黑启动的广州蓄能电厂为水电厂,交流系统最小的转动惯量为  $112 \times 28 = 3136 \text{ MW} \cdot \text{s}$ ;

3) 满足以上 2 个条件的同时,也满足了有效短路比  $>8$  的要求。

表 1 从西换流站黑启动电源

开机组合	短路电流 /kA	短路容量 /MVA	转动惯量 /( $\text{MW} \cdot \text{s}$ )
广蓄 A 4 台	2.94	2 672	6 040

由上述分析可知,溪洛渡直流逆变侧可满足条件的启动电源为广州蓄能 A 厂 4 台机,如表 1 所示。

仿真采用的启动模式为单极 70% 降压启动方式。

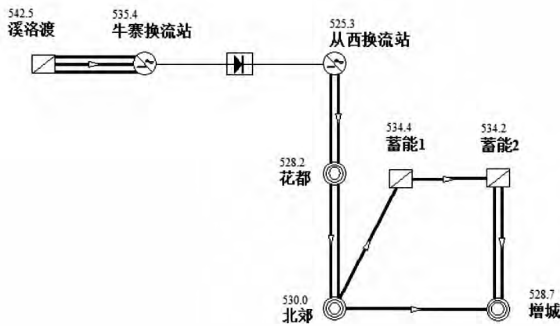


图 3 整流侧和逆变侧电网接线

整流侧和逆变侧均采用实际交流系统,开机方式为溪洛渡电厂 9 台机,广蓄 A 厂 4 台机,接线方式见图 3。整流侧和逆变侧短路容量分别为 12 342 MVA 和 2 672 MVA,转动惯量分别为 33 273  $\text{MW} \cdot \text{s}$  和 6 040  $\text{MW} \cdot \text{s}$ 。

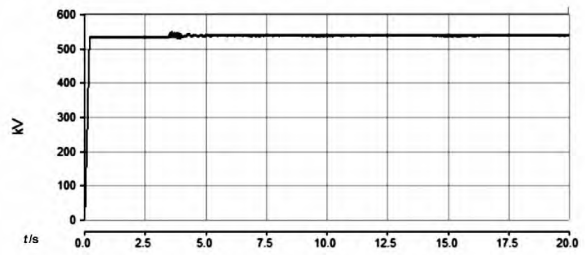
图 4 为仿真结果曲线,曲线从 (a) 至 (e) 依次为整流侧换流母线电压(kV)、逆变侧换流母线电压(kV)、直流功率(MW)、整流侧交流频率(Hz)、逆变侧交流频率(Hz)。

从图 4 可知,直流启动过程中系统运行平稳。运行平稳后,逆变侧换流母线电压为 560 kV,逆变侧最大频率偏差为 0.98 Hz。电压和频率值与估算值接近。

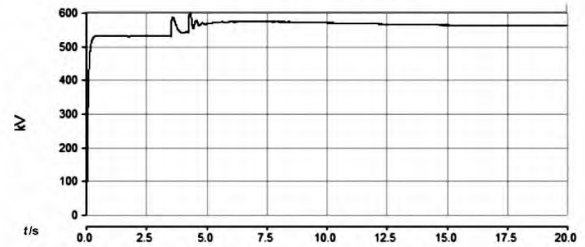
### 3.2 溪洛渡直流启动整流侧控制模式选择

从理论上分析,交流系统发生接地短路故障后,换流变电站母线电压将降低,因而直流电压也随之下降,定功率控制会使直流电流在瞬间增大。直流电压的下降和直流电流的上升都会使逆变侧关断角迅速减小,从而发生换相失败;定电流控制能够有效

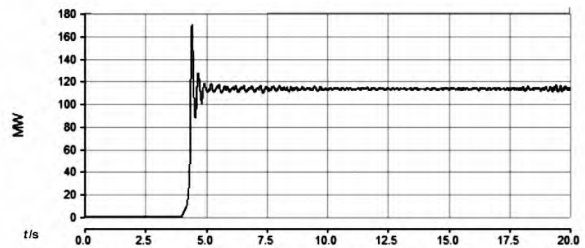
的减小交流系统故障后直流电流的上升,进而减小换相失败的时间,在一定程度上有利于故障的恢复。



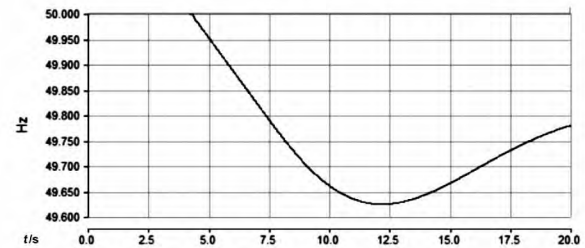
(a) 整流侧换流母线电压



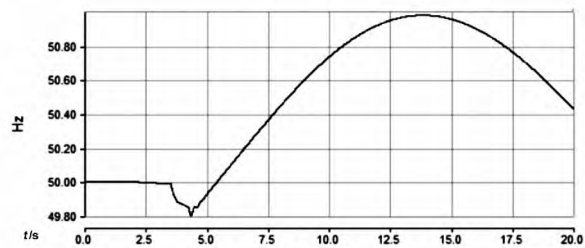
(b) 逆变侧换流母线电压



(c) 直流功率



(d) 整流侧交流系统频率



(e) 逆变侧交流系统频率

图 4 仿真结果

在仿真模型中,整流侧开机方式为溪洛渡电厂 9 台机,逆变侧为等值电源。

逆变侧换流母线发生 0.1 s 的三相短路故障,

逆变侧熄弧角  $\gamma$  的仿真结果如图5~图8所示。

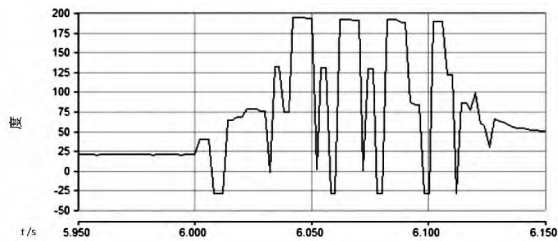


图5 定功率控制换相失败过程

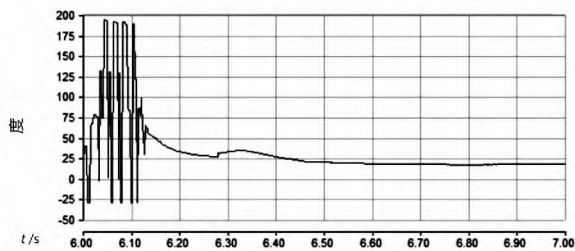


图6 定功率控制故障恢复过程

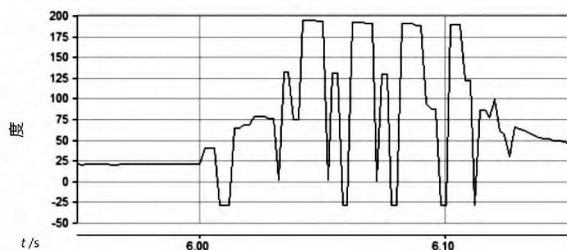


图7 定电流控制换相失败过程

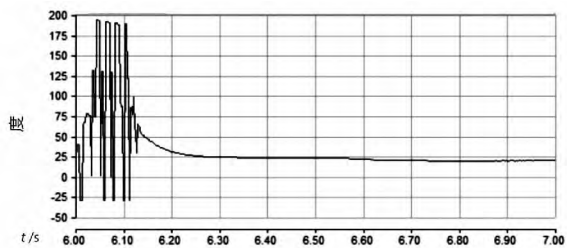


图8 定电流控制故障恢复过程

表2 定功率、定电流控制模式比较

控制模式	换相失败时间/ms	故障恢复时间/ms
定功率控制	112	441
定电流控制	112	573

表2为定功率、定电流两种控制模式下换相失败及故障恢复时间比较,可以看出故障发生后,两种控制模式的换相失败时间基本一样,都比较短暂,而故障恢复时间相差较多,定功率控制的特性反而优于定电流控制的特性,故障后最大直流电流也相差不多。

通过以上的分析和仿真研究,基于以下两方面

的原因,对于黑启动条件下,直流系统应选择定功率控制模式。

1) 交流系统发生短路故障时,虽然定电流控制模式的特性较好,但两者在换相失败时间上相差不多;

2) 故障后直流功率的快速恢复对交流系统的稳定会起到非常关键的作用,定功率控制故障后的恢复时间明显快于定电流控制。

### 3.3 鲁西直流黑启动

鲁西背靠背直流的柔性直流单元,采用可关断的电力电子器件进行换流,没有无功补偿问题和换相失败问题,不需要外加的换相电压,可为无源系统供电。

在云南电网大停电时,鲁西直流柔性直流单元作为黑启动电源实现云南电网黑启动。此时,云南电网负荷侧  $P_{load} = 1\ 000\ MW$ ,  $Q_{load} = 294\ Mvar$ 。换流站出口侧串入的限流电阻阻值为  $500\ \Omega$ ,  $0.25\ s$  切除该电阻,采用分组分时序的方法投入负载,将负载分为10组,每组有功功率为  $100\ MW$ ,无功功率为  $278\ Mvar$ ,从  $7\ s$  开始,每隔  $1\ s$  投入1组无源负载。电压、电流、频率、有功功率和无功功率的变化仿真结果如图9~图20所示。

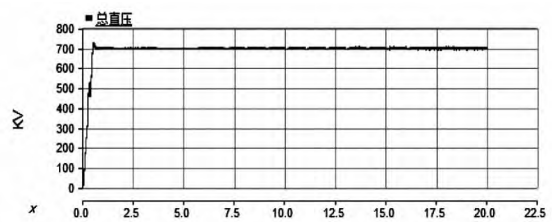


图9 直流母线电压

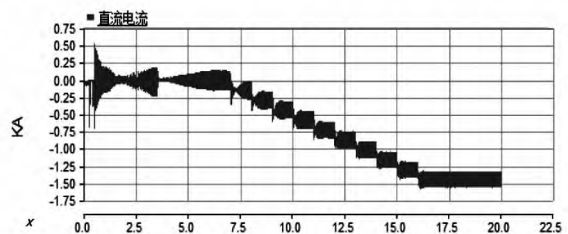


图10 直流电流

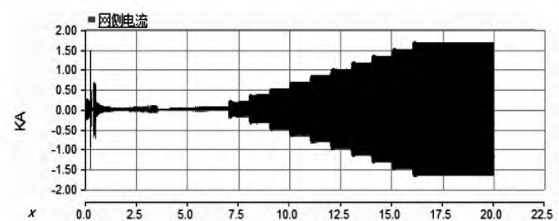


图11 广西交流侧电流

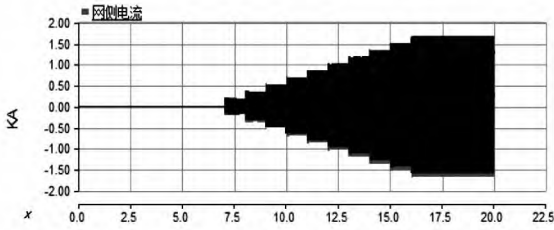


图 12 云南交流侧电流

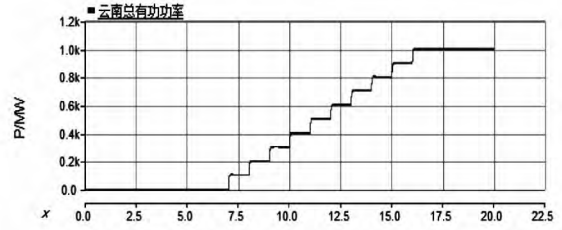


图 18 云南总有功功率

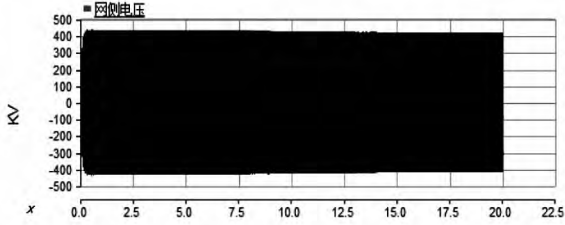


图 13 广西交流侧相电压

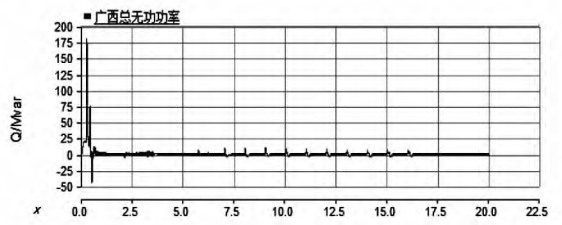


图 19 广西总无功功率

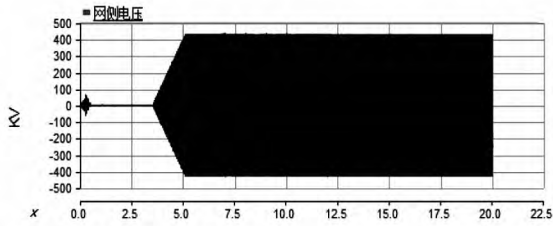


图 14 云南交流侧相电压

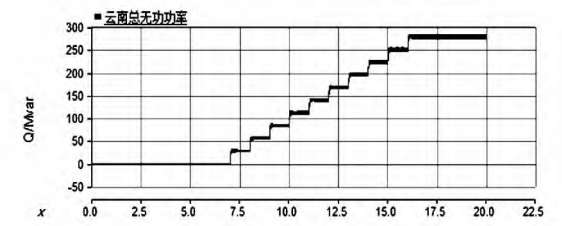


图 20 云南总无功功率

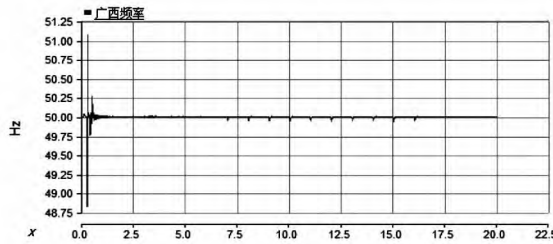


图 15 广西频率

从仿真结果可知,通过典型两阶段启动,广西侧子模块充电至额定值,直流电压也缓慢上升至额定值;同时,云南侧换流站子模块电容与广西侧换流站子模块电容同步充电至额定值。切换至定交流电压控制后,交流电压缓慢上升至额定值,顺利完成换流站的黑启动;并且,采用分组分时序的方法投入负载,有效避免了无源负载投入对交流系统频率和电压造成冲击。

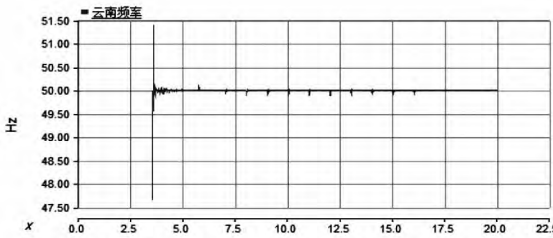


图 16 云南频率

## 4 结论

基于南方电网运行方式中的直调系统网架,以溪洛渡直流为例分析传统直流参与交流系统黑启动的技术条件,并选择鲁西背靠背直流为试点研究对象,研究基于 MMC 的新型直流参与交流系统黑启动的启动策略。主要研究结论如下:

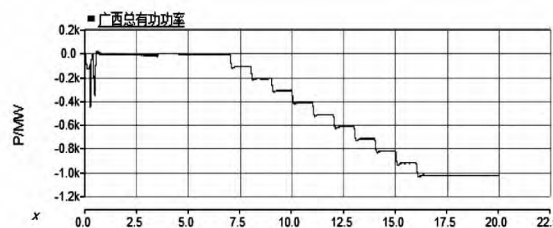


图 17 广西总有功功率

1) 溪洛渡直流参与黑启动时,若其逆变侧投入两组滤波器,受端短路容量需要为单组滤波器容量的 13.7 倍左右;考虑参与黑启动的广州蓄能电厂为水电厂,交流系统最小的转动惯量为 3 136 MW · s;为加快故障后直流功率的恢复,溪洛渡直流系统整流侧应选择定功率控制模式。(下转第 48 页)

的影响,建立含机会约束的规划模型,采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群算法对微网中各微电源运行出力进行优化。仿真结果显示多个微网与电网联合调度,可充分发挥微网“荷-源”双重特性的调度灵活性,解决可再生能源出力波动性对电网的影响,并兼顾微网运行经济性。同时,算例仿真表明不同备用约束置信度会对优化结果产生影响,实际运行下需权衡微网运行经济性与可靠性。

参考文献

[1] 龚正宇,刘继春,武云霞,等. 含风光储的多微网接入配网的联合调度策略[J]. 可再生能源, 2014, 32(11): 1665-1670.

[2] Katiraei F, Iravani R, Hatziargyriou N, et al. Microgrids Management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.

[3] 丁明,张颖媛,茹美琴,等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 78-82.

[4] 杨佩佩,艾欣,崔明勇,等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J]. 电网技术,

2009, 33(20): 38-42.

[5] 吴雄,王秀丽,别朝红,等. 含热电联供系统的微网经济运行[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 1-6.

[6] 丁明,张颖媛,茹美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.

[7] 顾伟,吴志,王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 177-185.

[8] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-9.

[9] Hetzer J, Yu D C, Bhattarai K. An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.

[10] 张伯明,吴文传,郑太一,等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 1-6.

作者简介:

陈颖(1986),硕士研究生、工程师,从事电网调度运行工作。  
(收稿日期:2016-05-08)

(上接第 31 页)

2) 在云南电网大停电时,鲁西直流柔性直流单元即可作为黑启动电源实现云南电网黑启动;为避免无源负载投入对交流系统频率和电压造成的冲击,应采用分组分时序的方法投入负载。

所提出的传统和新型直流参与交流系统黑启动的原则,能够为云南电网异步后,溪洛渡直流和鲁西背靠背直流的黑启动试验提供依据。

参考文献

[1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[2] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

[3] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[4] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[5] 廖武诗,姚伟,文劲宇,等. 电力系统恢复后网架重构和负荷恢复的两阶段优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(0): 1-10.

[6] 周剑,苏寅生,王新宝. 云广直流在南方电网黑启动及系统恢复过程的作用[J]. 南方电网技术, 2010, 4(4): 48-51.

[7] 周剑,李建设,苏寅生. 电网黑启动情况下高压直流输电系统启动条件分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 92-96.

[8] 李保宏,刘天琪,许韦华,等. 直流参与受端弱交流系统黑启动的技术条件[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 23-29.

[9] Lindstrom R R. Simulation and Field Tests of the Black Start of a Large Coal-fired Generating Station Utilizing Small Remote Hydro Generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 162-168.

[10] 李探,赵成勇,王朝亮,等. 用于电网黑启动的 MMC-HVDC 系统换流站启动策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 117-122.

作者简介:

赵睿(1986),博士、工程师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

卢斯煜(1986),博士、工程师,研究方向为电力系统规划、高压直流输电。

(收稿日期:2016-06-22)