

# 东西关电厂作为南充遂宁电网黑启动电源点的可行性分析

袁川<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>2</sup>, 张国松<sup>2</sup>, 吴磊<sup>1</sup>, 龚薇<sup>2</sup>

(1. 四川省电力公司 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

**摘要:** 电网全部或部分因故障停运后, 采用黑启动方案, 通过系统中具有自启动能力的机组带动无自启动能力的机组, 可实现整个电网的恢复。分析了黑启动过程中的关键问题, 对东西关电厂作为黑启动电源的可行性进行了理论分析, 并对不同类型的水电机组作为黑启动电源的优劣进行了比较。最后通过 PSCAD 仿真和试验, 验证了东西关电厂作为黑启动电源的可行性。

**关键词:** 黑启动; 水轮机; 东西关水电厂

**Abstract:** Taking use of black - start program, the generators with self - starting capability are used to drive the generators without self - starting capability to enable the recovery of the entire grid after the whole or part of power outage due to the fault. The key problems in the process of black start are analyzed, and a theoretical analysis for the feasibility of Dong Xiguan power plant being a black start source is carried out. The merits and demerits of different types of water turbine as black start source are compared. Finally, PSCAD/EMTDC is used for simulation, which proves the feasibility of Dong Xiguan power plant as a black start source.

**Key words:** black start; water turbine; Dong Xiguan power plant

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2012)01 - 0048 - 06

## 0 引言

东西关水电厂位于四川省武胜县境内的嘉陵江上, 是一座以发电为主, 兼顾航运、灌溉的综合性水利枢纽。电站装设 4 台 45 MW 的轴流转桨式机组, 年发电量为  $9.55 \times 10^8$  kWh, 采用河床式厂房布置形式, 按无人值班设计, 设计水头 17 m, 年平均运行水头 21.6 m, 计算机监控系统、调速器电柜、励磁系统及自动化元件等自动化系统设备采用瑞典 ABB 公司设备, 水轮机及其辅助设备由施耐德公司提供。电站水库库容  $21 \times 10^7$  m<sup>3</sup>, 调节库容  $165 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, 水库正常蓄水位 248.50 m, 汛期最低运行水位 241.00 m; 闸坝最大泄水流量 41 700 m<sup>3</sup>/s, 最高洪水位 259.96 m。电厂的电气主接线图如图 1 所示。

东西关电厂电动机与主变压器采用单元接线, 机组同期和换相在主变压器低压侧进行。机组励磁系统采用静止可控硅自并励系统, 其电源分别取自各机组主变压器低压侧, 经励磁变压器降压后向其励磁系统供电。厂高压直接从主变压器的低压侧取电, 在机

组停机或故障的情况下能不间断地从系统倒送电, 从而保证厂用电正常供电。同时, 还设置一台柴油发电机, 作为全厂停电时机组黑启动的电源和消防保安电源。

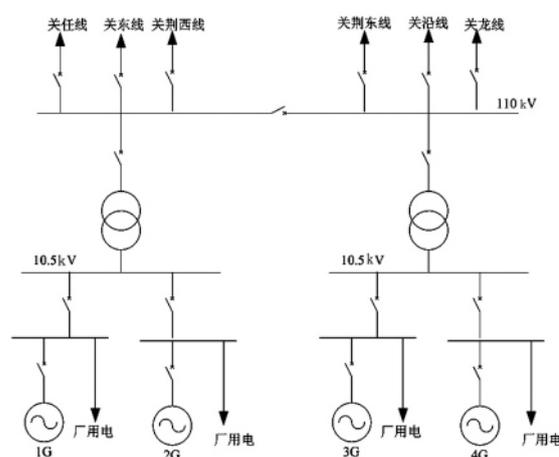


图 1 东西关水电站的电气主接线图

当发生大面积停电的重大系统事故时, 若无任何黑启动措施, 则会使停电时间延长, 造成国民经济重大损失。黑启动是电力系统安全运行的重要措施之一, 黑启动是指机组在无外界帮助下, 停运后能快速

恢复发电,并通过输电线给其他机组提供厂用电,使其他机组恢复发电运行,最终恢复整个系统,其目标是在最短时间内使系统恢复带负荷能力<sup>[1]</sup>。系统恢复的顺利与否关键在于启动电源即黑启动机组。机组黑启动时启动条件较为恶劣,因此,具有黑启动能力的机组应具备特殊的要求<sup>[2]</sup>。下面简要介绍了东西关水电站机组作为南充遂宁电网黑启动机组的特殊要求,以及黑启动的一般过程和步骤,并且比较分析了不同类型的水轮机组自启动能力的优劣,以及它们对黑启动效果的影响,最后通过试验验证了东西关电厂作为南充遂宁电网黑启动电源的可行性。

## 1 黑启动过程中的关键问题

### 1.1 励磁起励电源

在正常情况下,机组开机时的起励电源取自主变压器低压侧的励磁变压器,即从系统取电,系统瓦解后机组无法从电网取得励磁电源,励磁风机将不能运行,受功率柜温度限制,励磁系统可能无法长时间运行。东西关水电站黑启动时合上发电机出口开关,使励磁变压器连接到机端,此时采用220 V蓄电池的直流电源起励,通过正反馈建立机端电压,解决黑启动时励磁电源问题。在机端电压建立起来后,切换到通过励磁变压器供励磁电源。

### 1.2 调速系统和球阀液压操作动力

机组压油系统是提供机组液压操作动力的装置<sup>[3]</sup>。调速系统的油压装置一般能满足机组在运行中可能发生的最不利运行情况的需要,即首先甩去额定负荷,导叶接力器全关1次,然后摆动若干次(按进行1次全关闭考虑),接着机组又并入电网带上额定负荷,导叶全开1次(对转浆式水轮机其轮叶接力器也相应动作)。故在正常情况下,油压装置的油压可以保证机组进行一次正常自启动,因此在事故前压油罐的油压和油位很大程度上决定黑启动成功与否。东西关水电站压油系统油压是自动控制,每天不少于3次的巡回检查,保证压油罐的油气比例在正常值,额定工作压力为4.0 MPa,事故低油压值为3.0 MPa。机组调速器为交、直流220 V同时供电,交、直流电源可实现自动切换,调速器调节功能齐全,调节响应迅速,大大减少了调速器在机组启动以及停机备用时的耗油量。调速系统电气装置采用微机自动调节,调节参数整定好,调节灵活,控制部分均具有频率自动跟

踪功能,可实现机组空载以及孤立运行时的频率调节,能很好适应各种运行情况。调速系统能满足机组“黑启动”的要求。

### 1.3 机组导轴承发热润滑与主变压器冷却

东西关水电站发电机有推力、上导、下导三大轴承,其中推力和下导共用一个油槽。上导、推力和下导均利用电机的自泵式油循环系统作用使油进行外循环,外部加装冷却器;水导采用强迫油外循环水冷。在柴油发电机不可用时,水导轴承油泵不能运行使油循环,机组各轴承没有冷却水,机组轴承运行条件变差,为确保各轴承安全,黑启动时间不宜过长<sup>[4]</sup>。但在黑启动情况下,机组的轴承能够在没有冷却水的情况下运行15 min而不发生损坏,而东西关水电站机组正常启动时间只有3 min,可以在机组开启成功后带厂用电负荷。黑启动时直流注油泵投入运行,高压油通过轴瓦中心孔射出,在推力瓦与镜板间强制形成润滑油膜。主变压器冷却方式是强迫油循环水冷。在柴油发电机不可用时,则利用主变压器自身的允许温升能力,待机组开启成功带厂用电后,冷却主变压器。

### 1.4 监控系统

监控系统配置专用的不间断电源(UPS),由交、直流同时供电。在厂用交流中断的情况下,该UPS实现自动切换,正常承载负荷,保证监控系统在黑启动过程中正常运行。

### 1.5 照明和通讯、自动化系统

对于地下厂房或者在夜间操作的水电站,要保证事故照明满足条件,东西关电站正常时,厂房事故照明由交流和直流UPS供电,在厂用交流电源消失后220 V直流系统通过逆变供给仍能保证可靠供电。通讯采用程控、光缆、载波、移动通讯相结合,设有专用的通讯用蓄电池组,确保通讯系统可靠,满足黑启动期间的需要。机组监控系统、机组重要装置均采用交、直流供电或直流供电,能保证装置的可靠运行。

## 2 不同型式水电机组自启动能力

虽然与火电、核电机组相比,水轮发电机结构简单,没有复杂的辅机系统,厂用电少,启动速度快,是安全、理想、方便的电网安全恢复工具,但是不同类型的水电机组对黑启动也会产生不同的影响,因此有必要对不同型式的水电机组自启动能力进行比较。这

里对贯流式、混流式、轴流式3种水电机组的自启动能力进行比较,以便选择出更加适合的水电机组作为黑启动电源。

### 2.1 水轮机的类型

水轮机是将水能转变为旋转机械能的动力设备,它可分为两类:反击式和冲击式。这里主要讨论反击式水轮机。水流以辐向从四周进入转轮,而以轴向流出转轮的水轮机称为混流式水轮机。这种水轮机的适用水头范围为30~700 m。由于其适用水头范围广,且结构简单、运行稳定、效率高,是目前应用最广泛的一种水轮机。水轮机的水流在进入转轮时,流向与主轴中心线平行,水流经过转轮后又沿轴向流出的水轮机称为轴流式水轮机。轴流式水轮机又可分为定桨式和转桨式两种,其适用水头范围分别为3~50 m和3~80 m。当水轮机的主轴成水平或倾斜布置,装置在流道中,使水流直贯转轮,这种水轮机称为贯流式水轮机,贯流式水轮机过流能力较好,适用水头范围2~30 m<sup>[5]</sup>。

### 2.2 自保能力

机型不同,自保能力也不一样<sup>[6]</sup>。如混流式机组可以自流排水;由于轴流转桨式机组水导轴承安装高程相对较低,轴流转桨式机组顶盖积水通常采用水泵排水。一般来说,贯流式水电站的厂房为河床式,机组卧式布置。因此,尽管机组流道开挖深度较常规立式机组浅,但不能自流排除,因而采用水泵排水。所以对于轴流转桨式和贯流式机组来说,在黑启动时,当厂用电消失时间长,顶盖排水受阻,一旦水位超过水导转动油盆,则其完全失去自保能力。

### 2.3 适应负荷变化能力

混流式水轮机其叶片固定,转轮叶片不可调,出力依靠导水叶来调节,在偏离最优工况时效率会下降,不适合负荷变化较大的电站。轴流式水轮机以转桨式应用最多,因其叶片可随水头和导叶开度变化而协联转动的特点,其平均效率比混流式水轮机高,适合于负荷变化大、水头相对较低的电站。贯流式水轮机的转轮与轴流转桨式相同,只是流道形式有区别,因此在黑启动期间,可能出现负荷变化较大的情况下,宜采用轴流转桨式水电机组作为黑启动的电源。一般来说,水电机组相对火电机组来说,负荷调节速率快,适应范围广,抗干扰能力强,均具有较强的适应负荷变化能力(贯流式机组不具有自启动能力,不能作为黑启动电源考虑)。

### 2.4 工作特性曲线

一般来说,水电站水轮机通常在固定的转速下运转,水头的变化也比较缓慢,但机组负荷则是经常变化的。为表示水轮机工作在固定的转速和水头下的特性而绘制的曲线,即为水轮机工作特性曲线<sup>[7]</sup>,如图2所示为各类型水轮机工作特性曲线。

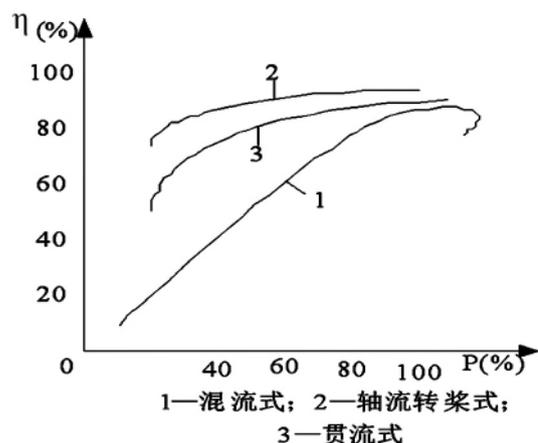


图2 各类型水轮机工作特性曲线比较

从曲线1可以看出,曲线末端呈弯钩形,当水轮机出力达到最大值后,若再加大导叶开度增加过流量,由于此时水轮机内水流条件恶化、水力损失加大、效率降低等不利影响超过了流量增加的有利影响,出力不但不增加,反而减小。在实际运行中不允许出现这种情况,因此混流式水轮机工作出力不得超过最大出力的95%。从曲线2、3可以看出轴流式、贯流式水轮机工作特性曲线的特点是高效区域比较宽,效率变化平缓,最大出力没有5%的出力限制。因此,在黑启动时,需要快速恢复负荷的情况下,高效率区间较宽、出力不受5%限制的机组更加适合作为黑启动的电源。

综上所述,不同类型的水轮机作为黑启动电源都有着各自的优缺点,同时也可以看出东西关电厂采用的轴流转桨式水电机组作为黑启动电源的可行性。

## 3 东西关水电站黑启动方案

### 3.1 黑启动原则

黑启动过程中应该遵循化整为零、分片启动,先主后次、有序供电,由下到上、按级恢复,快稳兼顾、可靠扩展的原则有序地进行电力系统的重构。确认系统故障导致大面积停电或厂用电全部消失后,应在权限范围内自行断开有关设备开关,做好黑启动准备,

取得调度同意后,选择油压装置中油压较高、顶盖漏水较小、自启动能力好、能实现自动开机的机组做“黑启动”机组,尽快开机恢复厂用电,厂用电恢复后,提起电站闸门,防止水库上水,并在调度的安排下逐步向系统恢复送电。

### 3.2 前期性能试验

为全面检验机组黑启动预案中各项操作的实际效果,了解机组黑启动状态下开机的可行性,进行了以下分项试验。

- 1) 模拟机组黑启动时,励磁风机停运后可控硅温度上升和报警试验。
- 2) 模拟机组黑启动时,机组事故低油压试验。
- 3) 油压装置的油压和油位特征值的确定。
- 4) 机组推力轴承及各导轴承油温和瓦温测试。
- 5) 直流系统。
- 6) 计算机监控系统。

### 3.3 试验一般步骤

1) 检查确认机组符合黑启动的相关条件,确认油位、油压、励磁、直流系统、UPS电源均满足黑启动试验条件。

2) 检查确认机组与系统隔离(相关的短路器和隔离开关在断开状态)。

3) 投入主变压器中性点隔离开关。

4) 投入机组冷却水系统。

5) 手动拔出机组锁锭,手动撤除机组制动闸。

6) 将调速器切手动,手动将导叶打开至空载开度,监视机组转速达到额定转速并稳定运行,再将调速器切回自动。

7) 投入机组励磁系统,手动起励,监视发电机机端电压正常。

8) 投入厂用变压器,逐步恢复厂用系统。

9) 对外恢复电网供电:可采用全电压向系统充电、零起升压这2种方式,具体方式在内部已经恢复厂用电的基础上由电网调度员调度,并按照其调令执行。

### 3.4 仿真黑启动机组带空载长线路过电压

黑启动过程中可能会出现空载长线过电压<sup>[8,9]</sup>,将会对设备的绝缘造成一定的危害,因此有必要在黑启动试验前,对机组带空载长线路过电压进行仿真研究。当东西关电厂机组空载情况下对110kV关任线线路充电时,仿真波形如图3、4、5所示。

由上述仿真结果可见,当东西关电厂单机带40km 110kV空线时,由于空载线路对地电容的影响,发电机相当于带了一定的容性负荷,由此致使在合闸瞬间发电机出口电压、线路末端电压都达到最大,其中机端相电压瞬时值接近15kV,最大值达13.5kV,线路终端瞬时电压接近182kV,但也迅速衰减为额定值,此过电压的过程对于设备的绝缘具有一定的危害。发电机出口电压并没有因助磁作用而相互继续增大或产生波动,因此在此情况下该机组没有发生自励磁。发电机端线电压有效值最大约10.73kV,远小于发电机过电压定值 $1.3U_N$ ,稳定后发电机进相无功稳定于1.51Mvar,远低于低励限制20Mvar,发电机仍然具有较大的无功调节能力<sup>[10]</sup>。

### 3.5 试验结果

根据上述试验方案,对东西关电厂进行了黑启动试验,并记录下了试验过程中任隆变电站的母线线电压和线电流的波形图,如图6所示。

从试验波形图中可以看出,在黑启动过程中,母线电压、电流以及电网频率都在正常范围内波动,表明了黑启动方案的正确性。

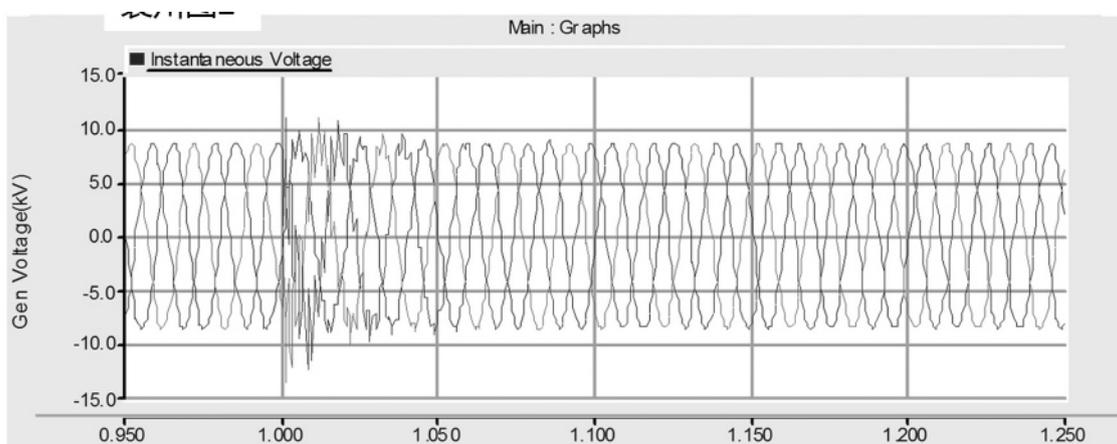


图3 机端相电压瞬时波形曲线

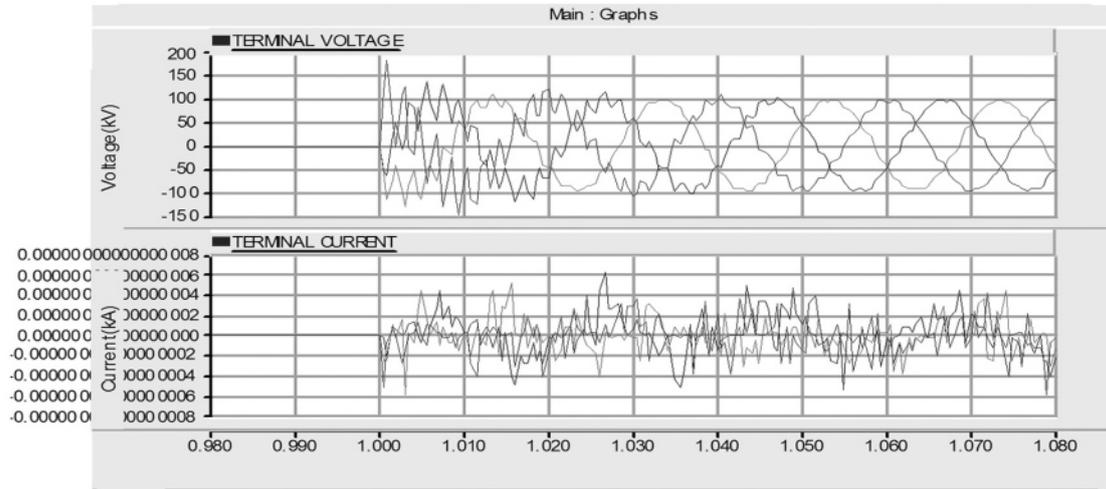


图4 线路终端相电压、电流曲线

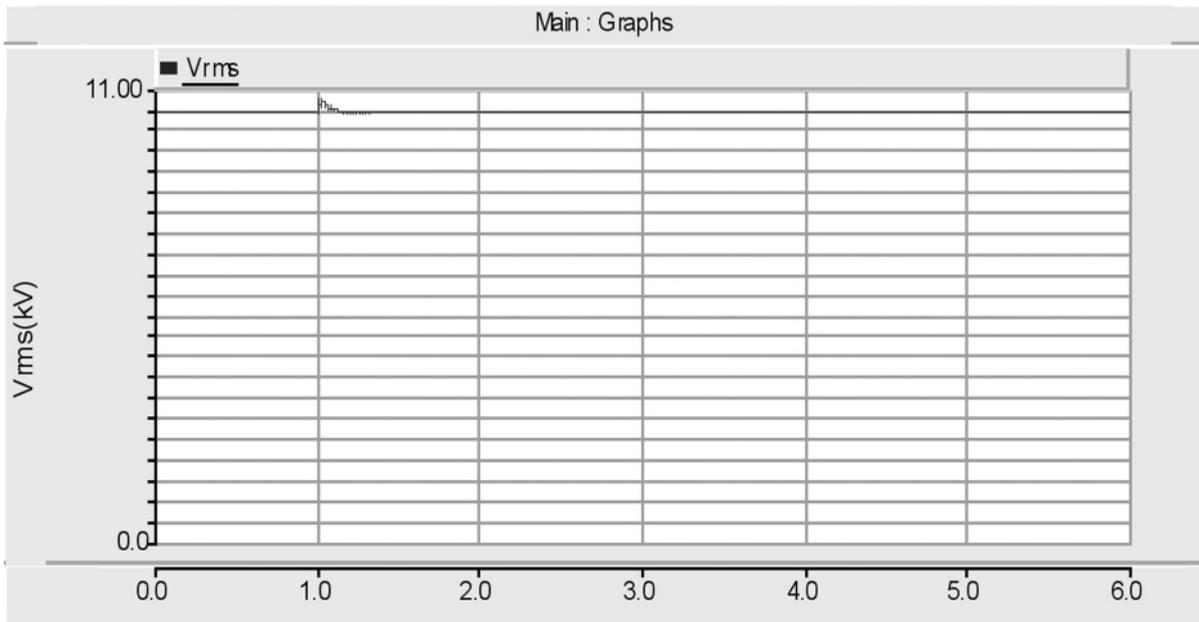


图5 机端线电压有效值变化曲线

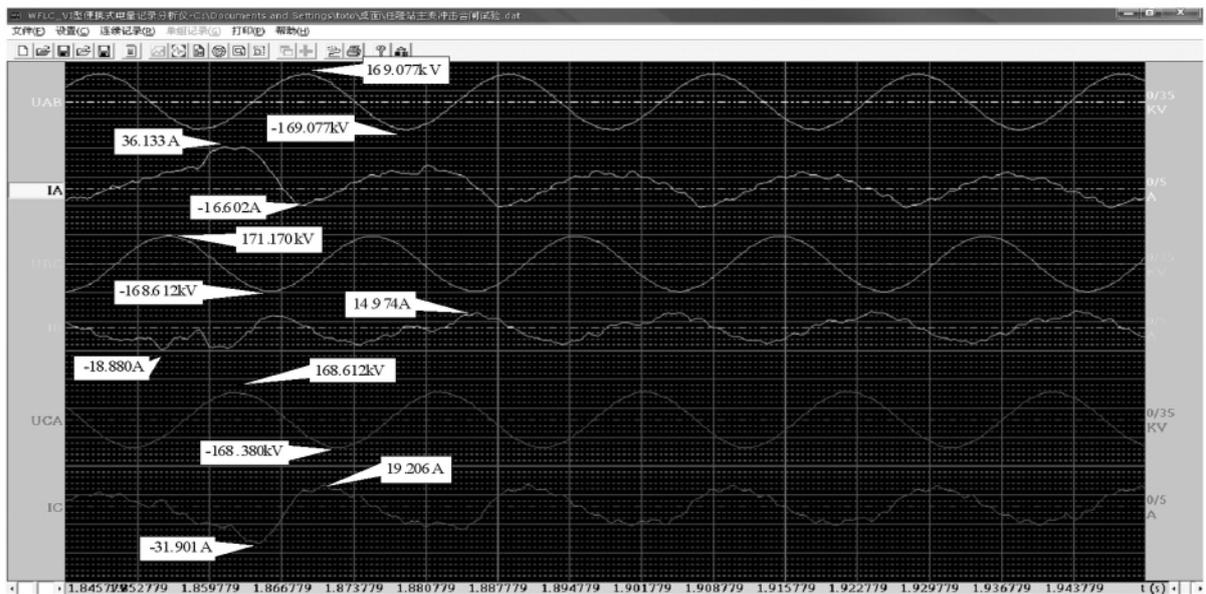


图6 东西关水电站黑启动试验 110 kV 母线电压电流波形图

## 4 结 论

介绍了东西关电厂黑启动方案的理论依据和实施过程,并且分析了不同类型的水电机组作为黑启动电源的优劣,为运行人员选择黑启动电源提供了理论依据。运用PSCAD对黑启动过程中的发电机带空载长线的过电压进行了仿真,仿真验证了黑启动方案的可行性。最后通过黑启动试验的成功,说明东西关电厂可以作为南充遂宁电网的黑启动电源点。

### 参考文献

[1] 熊惠敏,房鑫炎,郁惟慵,等. 电力系统全网停电后的恢复——黑启动综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 12-17.

[2] 陈湘君. 广州蓄能水电厂作为广东电网黑启动电源的可行性方案[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 42-44.

[3] 鲁丽娟. 实现电力系统黑启动的基本条件[J]. 电力安

(上接第8页)

能单元调节有功功率时,各子模块超级电容电压在充放电过程中也能保持均衡。图示风电接入点电压标么值能稳定在1附近,说明储能单元也具有快速的无功补偿能力,能满足有功功率波动时对无功功率的需求。储能单元可以实现有功和无功的快速综合补偿,从而大大降低风速波动对电网稳定性的冲击,也有利于风电机组自身的平稳运行。

## 4 结 论

对于采用异步电机的风电系统,在风速变化时,其输出有功功率会波动,导致吸收的无功功率发生变化,连接点的电压也随之改变,故储能单元需要具有有功和无功的综合补偿能力。超级电容具有大功率密度,能够循环使用,故成为一种合适的储能载体,而MMC作为一种模块化级联拓扑,其多电平电压输出不会对电网电能质量造成影响,将两者结合作为储能单元,仿真表明,其对风电系统具有灵活快速的功率调节能力,能平滑风电机组有功输出,稳定接入点交流电压,较大幅度提高了风电场并网运行稳定性。

### 参考文献

[1] 王文亮,葛宝明,毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.

[2] 李国杰,唐志伟,聂宏展,等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119, 125.

全技术, 2009, 11(12): 54-58.

[4] 李苏宁. 黑启动试验时发电机组运行方式的配置[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 104-107.

[5] 于永海,许健. 水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[6] 程刚. 葛洲坝二江电厂机组黑启动实践与分析[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 42-46.

[7] 沙锡林,陈新方,游赞培,等. 贯流式水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[8] T. Nagata, H. Sasaki. A Multi-Agent Approach to Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 2(17): 457-462.

[9] C. Y. Teo, W. Shen. Development of an Interactive Rule-Based System for Bulk Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 2(15): 646-653.

[10] S. Lee, S. Lim and B. Ahn. Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-criteria[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 3(13): 1156-1163.

(收稿日期:2011-09-15)

[3] 张占奎,王德意,迟永宁,等. 超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 38-42, 47.

[4] 阮军鹏,张建成,汪娟华. 飞轮储能系统改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(3): 5-8.

[5] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.

[6] Laxman Maharjan, Shigenori Inoue, Hirofumi Akagi. A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter with Star Configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1621-1630.

[7] 郭学英,金晓林. 基于超级电容器的风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电工电气, 2010(10): 1-5.

[8] 侯世英,房勇,曾建兴,等. 应用超级电容提高风电系统低电压穿越能力[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 26-31.

[9] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.

[10] 刘陆洲,肖建,王嵩. 感应电机的新型神经网络广义逆系统解耦控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(z1): 72-77.

[11] 黄崇鑫,王奔,邹超,等. 并联有源电力滤波器新型控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 52-55, 70.

[12] 屠卿瑞,徐政,姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-38, 44.

(收稿日期:2011-09-30)