

# 二滩电站枯水期无功经济运行策略研究

郭玉恒 唐杰阳

(二滩水力发电厂 四川 攀枝花 610098)

**摘要:** 枯水期, 电网负荷轻, 线路充电无功过剩, 线路负荷侧电压偏高, 需要机组深度进相调整电压。特别在低谷负荷段, 二滩水电站往往需要开额外的机组, 造成耗水率增加, 降低了经济运行水平。目前, 电网已启动并网发电厂辅助服务及运行管理考核工作, 对基本无功调节提出考核要求, 同时对额外无功调节进行补偿。针对当前实施辅助服务的新形势, 统计分析枯水期低谷负荷段的无功电压变化规律, 在保证电网和电厂安全稳定运行的前提下, 提出二滩电站枯水期无功经济运行策略, 以达到降低耗水率、提高运行效益的目的。

**关键词:** 枯水期; 辅助服务; 无功平衡; 进相运行; 经济运行

**Abstract:** In withered water period, the load of power grid is low, the charging reactive power of line is superfluous, so the generator needs leading phase operation deeply to adjust the system voltage, especially in low load periods, Ertan Hydropower Plant often needs opening additional units, which results in the increasing water consumption rate and the reduction of economic operation level. Now, the power grid has started the grid-connected power plant auxiliary services and operation management assessment, the evaluation requirements are proposed for the basic reactive power regulation, and the additional reactive power regulation is compensated. According to the new situation of auxiliary services, the variation rules of reactive power in valley period of load in withered water period are analyzed, and in order to ensure the stable and safe operation of power grid and power plant, the strategies of reactive power economic operation in withered water period for Ertan Hydropower Plant are proposed so as to decrease the water consumption rate and increase the operation benefits.

**Key words:** withered water period; auxiliary service; reactive power balance; leading phase operation; economic operation

中图分类号: TM714.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0091-04

二滩电站安装6台550 MW发电机组, 水库库容 $57.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 属季调节水库, 设计多年平均发电量170 TWh, 保证出力1 000 MW, 年利用小时5 162 h。电站作为川渝电网的骨干电源点, 却处于川渝电网末端, 送出通道共五回500 kV线路, 其中, 二普断面通过二普一、二、三线, 经普提变电站与四川主网相连, 在普提侧加装串联电容器补偿; 二石断面通过二石一、二线与攀枝花电网相连。

在电网实施辅助服务的新形势下, 无功调节已成为一种经济手段, 如何在保证电网和电厂安全稳定运行的前提下, 提高二滩电站无功经济运行水平, 以达到降低耗水率、提高运行效益的目的, 成为研究的重点。

## 1 线路与主变压器的无功运行分析

### 1.1 线路无功运行分析

随着川渝电网发展, 不断有新的500 kV高压输电线路投产, 由于线路分布电容作用, 特别在枯水期, 全

网负荷轻, 无功过剩的问题更加突出。枯水期低谷负荷段, 二普三回长距离输电线路接近空载运行, 线路本身与电网过剩无功的叠加作用, 要求二滩机组大大增加从系统吸收的无功容量, 不断增加进相深度, 甚至接近低励限制运行。因此, 研究枯水期低谷负荷段二滩电站侧的无功电压变化规律, 具有典型的参考作用。

500 kV线路正常运行方式是指二普断面三回线与二石断面两回线均投运, 且普提侧串联电容器补偿装置正常投运。统计正常运行方式下2009年12月至2010年5月间的典型历史运行数据, 绘制线路总无功与总有功、电压的关系曲面图, 见图1。

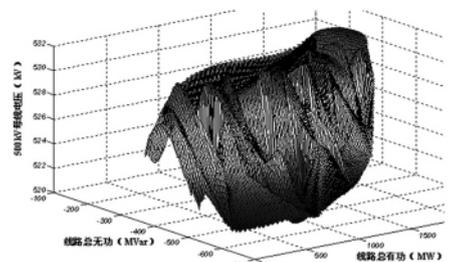


图1 枯水期线路无功与有功、电压曲面图

从图1关系曲面图可以看出,随着线路负荷减轻,无功过剩加剧,负荷侧电压也就越高,为了满足逆调压原则,二滩机组需不断增加进相深度,从系统吸收更多无功,降低二滩侧电压,但仍不能根本上解决系统电压偏高的问题;从关系曲面图可以看出,随着线路负荷升高、无功过剩程度逐渐减轻,为了维持二滩侧电压在电压曲线上限运行,需减轻机组进相深度,甚至迟相运行。

### 1.2 主变压器无功运行分析

变压器不作为无功电源,消耗电网中的感性无功,属于无功负荷之一。其无功功率损耗计算公式<sup>[1-2]</sup>如下。

$$\Delta Q = Q_0 + K_T \beta^2 Q_K \quad (1)$$

式中  $\Delta Q$  为无功功率损耗;  $Q_0$  为空载励磁功率;  $K_T$  为负载波动损耗系数;  $\beta$  为平均负载系数;  $Q_K$  为额定负载漏磁功率。

二滩电站每台主变压器由3台单相变压器组成,额定容量为  $214 \times 3 = 642$  MVA,查阅主变压器铭牌参数,统计枯水期6台主变压器的负载系数  $\beta$  在  $0.22 \sim 0.48$ ,计算6台主变压器枯水期总无功损耗  $\sum_{i=1 \dots 6} Q_i$  约为76 Mvar,即6台主变压器总共吸收的感性无功。

## 2 发电机无功运行分析

### 2.1 发电机进相运行

发电机是首先被考虑的调压手段<sup>[3]</sup>。因为它控制方便,不需要附加设备,不需要额外投资,充分利用发电机本身具有的发出或吸收无功的能力。发无功的能力与同时发出的有功有关系,由发电机PQ的极限曲线决定<sup>[4]</sup>。

发电机进相运行是结合电力生产需要而采取的一种运行技术,即由改变发电机的运行工况达到降压的目的,具有平滑无级调节电压的优点,又可降压节能。但发电机进相运行要受到静稳定、定子端部发热和厂用电电压降低等的限制,需对发电机作进相运行试验<sup>[5]</sup>,以确定其进相能力,为发电机的进相运行提供可靠依据。

根据机组进相运行低励限制定值表,可以推导出二滩机组励磁装置低励限制整定关系式为

$$Q_{\min} = \frac{5}{11} P_c - 300 \quad (20 \text{ MW} < P_c \leq 575 \text{ MW}) \quad (2)$$

### 2.2 无功辅助服务补偿

依据《华中区域电网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)》和《华中区域发电厂并网运行管理实施细则(试行)》,并网发电厂应提供基本无功调节服务,即发电机组应具备功率因数在  $0.9 \sim 1.0$  范围内向系统注入或在  $0.97 \sim 1.0$  范围内从系统吸收无功功率的能力。有偿无功电量为发电机组在进相功率因数低于  $0.97$  时从系统吸收无功或在迟相功率因数低于  $0.9$  时向系统注入的无功电量。对有偿无功调节电量给予经济补偿。

### 2.3 发电机进相运行与无功辅助服务补偿

根据机组进相运行低励限制表以及无功辅助服务补偿规定,得出机组进相运行区域图,如图2所示。

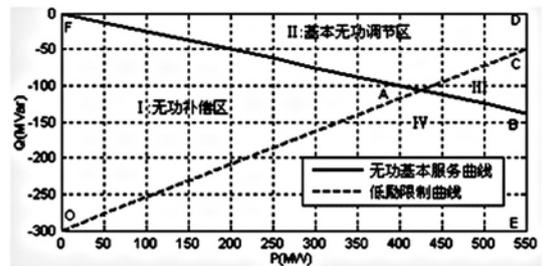


图2 发电机进相运行区域

从图2可以看出,区域I(O-A-F)为低励限制曲线与无功基本服务曲线之间的区域,既满足低励限制,又满足无功服务补偿的要求,属于无功补偿区,是机组的优化运行区域;区域II(F-A-C-D),既满足低励限制,又满足基本无功调节的要求,属于基本无功调节区;区域III(A-B-C)不满足低励限制,大于430 MW时,发电机进相功率因数达不到基本辅助服务规定值  $0.97$ ,为无功考核区;区域IV(O-A-B-E)位于低励限制曲线以下,为机组不可运行区域。

综上所述,机组无功经济运行最主要是优化机组有功、无功分配,尽量在区域I运行。

## 3 无功经济运行策略研究

### 3.1 系统无功平衡

电压取决于无功平衡<sup>[6]</sup>。具体来说,枯水期二滩电站从系统吸收过剩的感性无功,主要由两部分消耗,一是主变压器作为感抗元件消耗无功;二是机组采用进相运行吸收无功。综上所述,得出线路无功、主变压器损耗无功以及机组进相无功三者平衡的公式如下。

$$\sum Q_C + \sum Q_T = \sum Q_L \quad (3)$$

式中,  $\sum Q_C$  为机组总进相无功;  $\sum Q_T$  为主变压器总消耗无功,取枯水期的统计计算值  $-76$  Mvar;  $\sum Q_L$

为线路从系统吸收的总无功,三者单位均为 Mvar。

### 3.2 无功经济运行策略

#### 3.2.1 3台机无功经济运行

枯水期典型运行方式,是指3台机并网调压,6台主变压器投运,二普三回线与二石两回线均投运,且普提侧串联电容器补偿装置正常投运的运行方式。根据统计的线路无功历史运行数据、统计计算的主变压器无功损耗值,结合机组低励限制曲线、无功辅助服务,研究无功经济运行策略。

将图1中线路无功与有功、电压关系曲面图投影到X-Y平面,形成有功、无功等值线,考虑主变压器无功损耗,画出3台并网发电机共同作用下的低励限制曲线与无功基本服务曲线,得到图3。

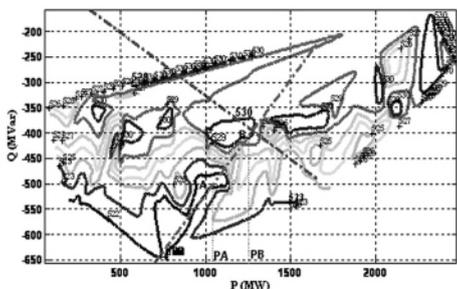


图3 3台机运行时的无功平衡

从图3可以看出以下两点。

一是分析不同电压等值线,相同负荷,电压越低,需要从系统吸收的无功越多。

二是分析图中B点的关系,在530 kV下,当系统负荷大于PB时,由于低励限制,系统无功失去平衡,机组吸收的无功(考虑主变压器无功消耗)不足以抵消线路分布电容产生的无功,造成系统无功过剩,系统电压抬高。为了防止电压越限(枯水期低谷段电压曲线上限为530 kV),则需要额外开一台机调整无功电压,此时PB小于3台机额定出力总和。可以看出即使系统有功满足要求,仅仅为了调压,也需要开出额外机组,造成耗水率增加,降低了经济运行水平。

如何在满足系统电压的要求下,最大程度提高系统允许运行出力,减少开机台数,降低耗水率,成为无功经济运行策略研究的重点。

#### 3.2.2 无功经济运行策略

提高电站无功经济水平的关键是如何完全彻底地解决系统过剩无功消纳问题,尽量保持最小开机方式运行。从系统侧来看,是要解决二普断面、二石断面无功倒送问题,虽然普提变电站、石板箐变电站已装设并联电抗器,但随着电网发展、高压输电线路的

投运,系统无功过剩问题却有加重的趋势,成为影响二滩无功经济运行的负因素。从二滩电站侧,为了满足调压要求,提高经济运行水平,理论上有三种方式可以考虑:一是提高机组低励限制能力,增加机组最大允许进相深度;二是在500 kV母线高压侧装设并联电抗器;三是调整主变压器绕组分接头挡位,也就是提高主变压器作为感抗元件消耗无功的能力,改变无功潮流的分布,而二滩主变压器为无载调压变压器,调整挡位和主变压器停电和测量接触电阻,涉及的工作面大,同时频繁调整,有降低主变压器作为主设备运行可靠性的风险,实际运行中不予采用。

讨论3台机在不同方式下的系统无功平衡关系,如图4所示。

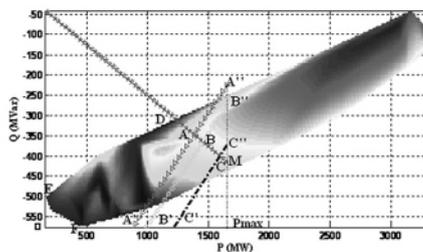


图4 3台机在两种方式下的无功平衡

图4中颜色区域为系统有功、无功在不同电压下的等值线图,随着负荷升高,系统运行电压被逐步抬升,符合逆调压的原则。从图4可以看出,当采用增加机组低励限制功能,增加进相深度时,由曲线A'-A''右移至B'-B'',无功补偿区域由A-A'-F-E-E-A扩展至B-B'-F-E-E-B,相应基本无功调节考核区减小,增加了允许运行的最高负荷。同理,采用装设高压电抗器,等效无功低励限制曲线移至C'-C'',无需增加机组进相深度,而消耗容性无功的能力仍大大加强,无功补偿区域大大扩展,而基本无功调节考核区相应减小。

考虑增加机组进相深度,无需增加设备投资,充分利用发电机平滑无级调节电压的优点,但使得机组接近极限运行,降低了安全稳定水平,并且2007年二滩机组已提高过低励限制能力,实际可允许进相的冗余度很小,并不能彻底解决未来电网发展带来的持续无功过剩问题。

考虑装设高压电抗器,实现无功的分区平衡在二滩侧高压母线就地装设带开关的高压补偿电抗器(或可控高压补偿电抗器),大大增加电站侧吸收无功的能力,从而大大减轻机组吸收无功的负担,在枯水期低谷负荷段,甚至只需开2台机运行。故研究二滩电站枯

水期无功经济运行策略重点主要在以下3方面。

一是加强500 kV厂站间无功电压协调,实现无功分层分区平衡。枯水期轻负荷时段500 kV各厂站,特别是与二滩电站电气紧密联系的普提、石板箐变电站,应在保证安全运行的前提下,采取机组高功率因数或进相运行、退出低压电容器和投入低压电抗器等措施,将500 kV电压控制在电压曲线偏下限区域运行,为枯水期低谷负荷段正常方式下二滩电站保持最小开机方式创造有利条件。

二是研究机组间无功负荷的优化分配。二滩电站AVC采用等功率因素分配无功原则,目标函数是全厂效率最高,没有考虑无功补偿。另外,等功率因素原则要求有功出力大的机组进相深,而机组实际允许进相能力却低,接近低励运行;反而有功出力小的机组进相浅,大大浪费掉带低负荷机组的高进相能力,总体趋势是抬高机组功率因素,尽量在基本无功调节区域运行,降低了无功补偿效益。

三是研究在二滩高压侧装设带开关的分组补偿电抗器。根据系统无功负荷分组投入,可以大大减轻机组进相运行压力,枯水期低负荷段开2台机将成为典型运行方式,大大降低耗水率,同时无功补偿区域范围也大大增加。综合考虑到枯水期1.5倍的基准电价、入库流量以及无功补偿等因素,大大提高了装设高压电抗器的经济性,因此,对就地加装高压电抗器进行专题研究成为二滩电站无功经济运行的重要课题。

(上接86页)

路。在集控中心实现程序化操作功能,最大限度保留现有投资建设,使程序化操作模块具有足够的通用性和可扩展性。同时,这种应用改造的设计对其他即将建设和改造的变电站也有一定的借鉴和推广意义。

### 参考文献

[1] 薄鑫. 浅析程序化操作在变电站中应用[J]. 南京供电技术, 2009, 3: 57-58.

[2] 黄国栋, 陈志军, 张平. 500 kV 监控中心程序化操作应用[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1761-1763.

[3] 王晶晶, 李群炬, 刘巍, 等. 面向智能电网愿景的无人值班站科技应用若干思考[J]. 华北电力技术, 2009, (12): 18-20, 24.

[4] 陈国飞, 李有春, 钱平. 程序化操作在500 kV 兰溪数字化变电站的应用[J]. 电力建设, 2009, 30(7): 104-105.

## 4 结 语

在统计分析2009—2010年枯水期二滩电站线路无功变化规律的基础上,结合主变压器无功损耗分析、机组进相运行与无功辅助服务补偿关系,提出二滩电站枯水期无功经济运行策略:一是加强500 kV厂站间无功电压协调调整;二是机组间的无功负荷优化分配;三是在高压侧装设补偿电抗器。

### 参考文献

[1] GB/T 13462-2008, 电力变压器经济运行[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[2] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[3] PRabha Kundur. 电力系统稳定与控制(影印版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[4] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94-97.

[5] 刘平, 江建明. 四川电网发电机进相试验研究[J]. 四川电力技术, 2005, 28(1): 8-11.

[6] Carson W. Taylor. 电力系统电压稳定(影印版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

作者简介:

郭玉恒(1973), 男, 本科, 高级工程师, 从事水电站运行及技术管理;

唐杰阳(1981), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事水电站运行管理。

(收稿日期: 2011-05-09)

[5] 王永明, 郭碧媛, 张丰. 分布式变电站程序化操作系统的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 92-94.

[6] 程明, 金明, 李建英, 等. 无人值班站监控技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[7] 丁泉, 朱米强, 胡道徐, 等. 变电站程序化操作及远动装置在其中的应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 119-121.

[8] 唐涛. 电力系统厂站自动化技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 92-97.

[9] 朱一晨, 沈键, 庄卫金, 等. 集中监控系统程序化操作功能设计与实现[J]. 华东电力, 2008, 36(1): 30-34.

作者简介:

李 杨(1985), 男, 工程师, 工学学士, 从事继电保护及厂站自动化维护相关工作;

郭小龙(1983), 男, 工程师, 工学硕士, 从事继电保护及厂站自动化维护相关工作。

(收稿日期: 2011-03-22)