

太阳能发电技术特性研究

党锁刚, 高富春, 汉鹏武, 王丽萍

(中国华电集团新能源发展有限公司甘肃分公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要:论述了光伏逆变器模型及其控制策略,分析了接入电网的各种特性,确立了动态无功补偿设备容量与形式的选择标准。探讨了光伏电站的出力特性及运行方式选择,研究了电网在异常情况下光伏电站的低电压穿越能力和动态无功补偿设备对光伏电站低电压穿越能力的增强作用。仿真分析认为,华电嘉峪关光伏发电项目满足电网接入条件,理论及仿真分析较为准确,其经验可供今后光伏电站发展时借鉴和参考。

关键词:光伏逆变器;电压控制;空间矢量;最大功率点;孤岛检测;接入电网特性;低电压穿越

中图分类号:TK 511 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2010)06 - 0076 - 05

0 引言

在能源和环境问题备受关注的今天,太阳能作为一种洁净的可再生能源在许多国家得到了迅猛发展。随着我国各地大型光伏基地示范工程的逐步并网,光伏发电系统的整体建模分析与并网特性研究迫在眉睫^[1-4]。国内外对光伏发电原理、光伏控制策略、光伏电能质量等方面的分析较多,而对光伏接入电网特性的研究偏少^[5-7]。

光伏电源是一个典型的离散控制系统,本文依托华电嘉峪关10 MW(峰值功率)光伏电站工程,详细分析了该光伏电站接入电网的条件及对电网所带来的各种影响,为电网的合理调度和安全经济运行提供理论依据。

1 光伏发电系统原理

如图1所示,大型光伏系统主要包括光伏电池系统、直流/交流转化系统、交流并网系统和控制系统

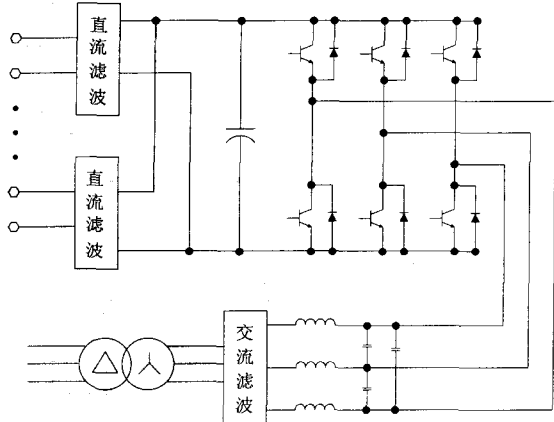


图1 大型光伏系统原理

统、滤波系统5大部分。光伏电池系统利用光伏电池的伏打效应将光能转化为直流电能;直流电能经直流/交流变换电路转化为并网交流电能;交流并网系统主要解决光伏电站的并网措施;控制系统则为光伏电站提供所需的控制信号及保护措施;滤波系统包括直流滤波环节和交流输出滤波环节,从硬件上减小直流输入扰动和交流输出谐波。

2 电压控制策略

光伏系统并网即逆变器与电网并联运行,滤波支路容量相对较小,线路阻抗主要呈现为感性。逆变器输出视在功率为

$$\begin{aligned} \bar{S} &= P_1 + jQ_1 = EI^* = \\ E \left[\frac{E_1 \cos \delta + jE_1 \sin \delta - E}{jX} \right]^* &= \frac{E_1 E}{X} \sin \delta + \\ j \left[\frac{E_1 E \cos \delta - E^2}{X} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中: X 为逆变器输出阻抗; δ 为逆变器输出电压矢量 E_1 与电网电压矢量 E 之间的夹角。

逆变器输出有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P = \frac{E_1 E}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{E_1 E \cos \delta - E^2}{X} \end{cases}, \quad (2)$$

则逆变器输出有功功率受功角 δ 的影响,无功功率决定于输出电压幅值 X_1 。因此,逆变器输出电压的相位与幅值与其输出有功功率和无功功率近似线性耦合。逆变器输出电压幅值可以直接控制,而相位可以通过调节输出频率来实现。通过逆变器输出电压幅值即可达到调节输出无功功率的目的,通过调节频率可以达到输出有功功率的目的。

从直流侧来看,光伏电池阵列工作点处的电压

决定了其输出电流,即决定了逆变器输入功率。从交流侧来看,电网可以看成恒压电源,并网功率可由并网电流的大小来体现。

由图 2 太阳能电池输出特性曲线可知,光伏电池的电压决定了光伏电池输出有功功率的大小。故将光伏电池电压调节器的输出作为并网有功功率的给定量。当电网侧需要无功功率时,则检测电网侧所需的无功功率作为并网无功功率的给定量。光伏电池工作在一个预先设定好的矩形区域内。

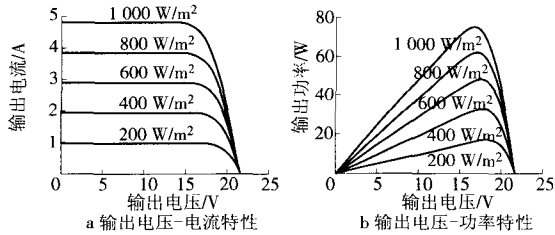


图 2 太阳能电池输出特性曲线

3 空间矢量控制原理

通过以上分析可知,大型光伏系统目前多采用有功、无功解耦控制,为逆变器空间矢量控制算法提供了基础,逆变器控制脉冲空间矢量算法是为减小注入电网谐波含量,包括正整数次、负序、零序及非整数次谐波(统称为广义谐波)。

空间矢量脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)是实现三相功率 6 个功率开关管控制的一种方法,这种方法能够保证三相逆变电流中产生较少的谐波。与正弦调制相比,能够提高直流电源的利用效率。

a, b, c 分别代表逆变器 3 个桥臂的开关状态,规定如下:当上桥臂开关管“开”状态时(此时下桥臂必然是“关”状态),开关状态为 1;当下桥臂开关管“开”状态时(此时上桥臂必然是“关”状态),开关状态为 0。3 个桥臂只有“1”或“0”2 种状态,因此, a, b, c 形成 000,001,010,011,100,101,110,111 共 8 种(2^3) 开关模式。其中,000 和 111 开关模式使逆变器输出电压为零,所以,称这 2 种开关状态为零状态。

三相逆变器输出的线电压矢量 $[\mathbf{U}_{AB} \ \mathbf{U}_{BC} \ \mathbf{U}_{CA}]^T$ 与开关状态矢量 $[\mathbf{a} \ \mathbf{b} \ \mathbf{c}]^T$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{AB} \\ \mathbf{U}_{BC} \\ \mathbf{U}_{CA} \end{bmatrix} = U_{DC} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \end{bmatrix} \quad (3)$$

三相逆变器输出相电压矢量 $[\mathbf{U}_A \ \mathbf{U}_B \ \mathbf{U}_C]^T$ 与开关状态矢量 $[\mathbf{a} \ \mathbf{b} \ \mathbf{c}]^T$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, U_{DC} 是直流母线电压。

并网侧实时有功功率和无功功率分别与给定量相比较即对应逆变电路的控制脉冲信号,则根据瞬时无功功率理论,可得逆变器控制信号为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

4 最大功率点跟踪策略

光伏电池输出功率是外界温度、日照强度等因素的非线性函数,在同一外部条件下,光伏电池存在唯一最大功率输出点。为充分发挥光伏电池的效能,在实际应用中要使光伏电池始终工作在最大功率点。

最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)算法实际上是一个自寻优过程,通过检测光伏电池当前输出电压和电流计算得到当前光伏电池输出功率,再与前一次计算结果相比较,将较大者保存为下次比较对象,从而可使光伏电池稳定工作在最大功率点上。

光伏电池最大功率控制即光伏电池输出特性如图 3 所示,其中: P 为光伏阵列的输出功率, U 为光伏电池输出电压。令当前计算功率为 P_n ,前一次计算结果为 P_s ,若 $P_n > P_s$,则 $U = U + dU$ ($dU = dU_1$ 或 dU_2)。反之, $U = U - dU$ 。实际算法中,还应加入跟踪误差和光照变化及电网剧烈扰动引起的直流母线电压波动防护措施。

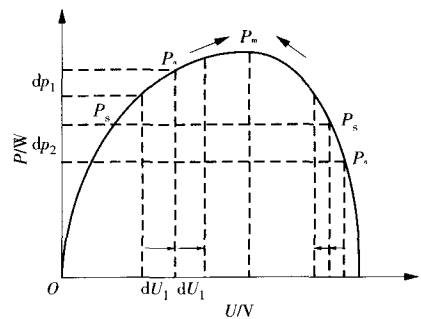


图 3 P-U 关系曲线图

5 孤岛检测

主动频率偏移法是通过周期性地改变并网电流频率来实现反孤岛效应功能的。系统逐周期地检测出电网电压的频率后稍微增大或减小固定值以作为并网电流的给定频率并在电网电压每次过零时使并网电流复位。当并网时,检测装置每次检测到的电网电压频率不变;当脱网时,并网电流单独作用于负载上,由于并网电流频率的逐周期改变,使得每次检测到的频率会逐渐增大或减小,很快达到给定频率保护的上、下限值使保护动作。一种主动频率偏移法波形畸变图如图 4 所示。

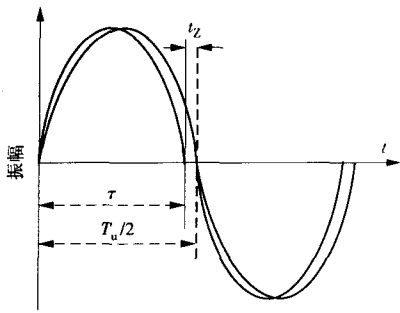


图 4 频率偏移法畸变波形示意图

主动频率偏移法对纯阻性负载不存在检测盲区,而 RLC 并联负载也仅仅在特定的相角区域存在盲区,检测响应时间短。

6 光伏电站出力特性

从图 5 光伏电站出力特性曲线中可以看出:晴朗天气下敦煌地区光伏电站出力形状类似正弦半波,基本在上午 7 时至下午 20 时区间内;当云层遮挡阳光等非理想天气状况下,光伏电站出力减小。

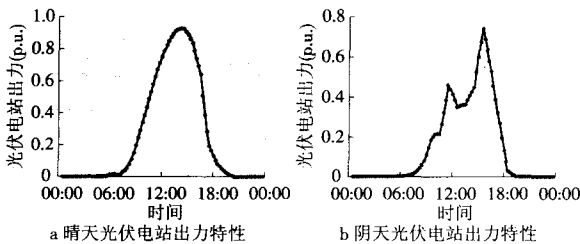


图 5 光伏电站出力特性图

光伏电站因其清洁环保、不消耗常规能源的特性,在公网状况允许的情况下,投运后各级调度系统应保证其按最大出力工况运行,以节省常规能源的消耗,特殊情况时可根据实际要求限制出力。

7 背景电网介绍

考虑光伏系统并网的复杂性,本文选用甘肃嘉峪关-酒泉地区电网作为分析背景。该地区电网有火电厂、小水电站、居民负荷、工业负荷、牵引变电站负荷等构成,网络结构较为复杂,能比较准确地检验光伏电站上网引起的各种电网问题。在该系统中,华电嘉峪关光伏电站装机容量共 10.032 MW,共 20 台 500 kW(峰值功率)逆变器,以一回 35 kV 线路接入嘉北 110 kV 变电站。

由于光伏电站只在白天出力,故需分析大方式下潮流特性(大方式潮流分布图如图 6 所示)。由图 6 可以看出,华电嘉峪关光伏电站接入电网后,一定程度上可以平衡当地负荷,减轻枢纽 330 kV 下网出力,对当地各变电站电压有一定的提升作用。

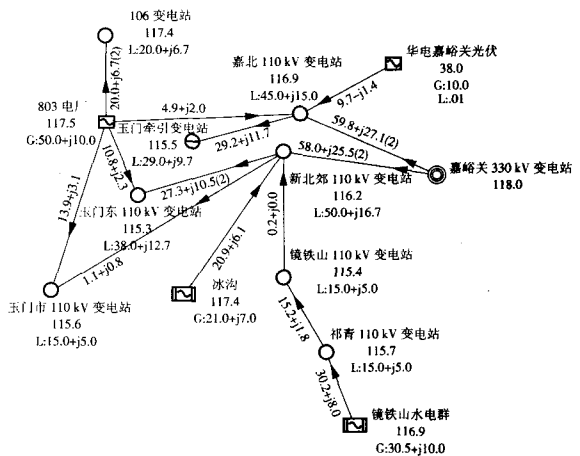


图 6 大方式潮流分布图

8 逆变器输出波形

根据电网实际运行要求,光伏电站需有功、无功解耦控制以方便电网调度,从而为逆变电路的空间矢量控制算法奠定基础。根据瞬时无功功率理论建立的光伏电站逆变器空间矢量控制算法,相比普通正弦波调制,可降低光伏电站整体输出电压、电流谐波含量,并提高直流电压利用率,从而提高光伏电站转化效率。

由图 7 逆变器输出电压电流波形图可以看出,基于本文理论建立的大型光伏系统逆变器实测输出电压、电流波形接近理想的正弦波。

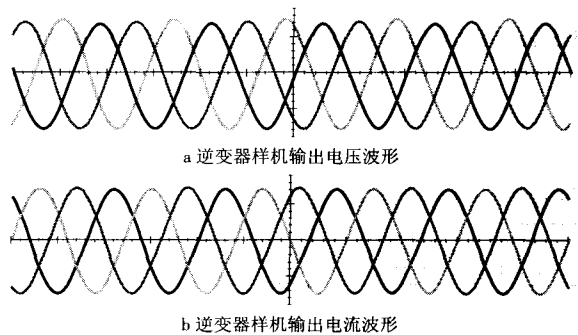


图 7 逆变器输出电压电流波形图

9 动态无功补偿

当电网侧发生瞬时故障时,光伏电站本身不能提供瞬间的电压支撑,容性动态无功补偿装置的装设尤为必要。同时,容性动态无功补偿装置可显著提高光伏电站各母线电压,增强光伏电站低电压穿越能力。

当由于天气状况变化引起光照发生变化时,光伏电站出力发生变化,从而引起公网接入点电压波动。因此,光伏发电系统同其他分布式电源一样,必须配置相应容量的容性和感性动态无功补偿设备,以抑制公网接入点处母线电压波动。装设动态无功

补偿装置后,光照发生变化时引起的各主要节点电压最大波动值为 1.30%,未超出规程要求,逆变器输出电压基本恒定。

光伏电站因夜晚光照不足而退出运行时,公网接入点电压升高,此时需要配置相应容量的感性动态无功补偿设备,以抵消线路的充电功率。装设感性动态无功补偿装置后,在光照发生变化时引起的各主要节点电压最大波动值为 2.21%,未超出规程要求。

该工程动态无功补偿装置采用静止无功补偿器(SVC),动态性能略差,故障时反向冲击电压略大,但能满足运行要求。考虑到动态无功补偿装置(SVG)价格的逐步降低,今后可考虑采用 SVG 等新型动态无功补偿设备,以提高光伏电站整体动态响应性能。

10 低电压穿越

光伏发电系统本身无旋转设备,不具备传统电源的机电暂态特性。分布式电源在系统侧故障时不脱网,是分布式电源并网的基本要求。因此,研究光伏发电系统公网侧发生瞬时故障时低电压穿越能力具有非常重要的现实意义。

在该工程计算模型中,光伏电站按恒功率因数和动态无功补偿装置未投运时的极端运行工况设置,以检验光伏发电系统的低电压穿越能力。鉴于在光伏电站满出力状况即正午时段发生电网扰动时对光伏电站运行影响较大,故此次仿真选择为光伏

电站 100% 出力。

从图 8 暂态特性响应曲线中可以看出,光伏电站由于其逆变电路及其控制电路的钳制作用,短路电流相比额定电流增加不大。当光伏电站 35 kV 母线发生三相短路故障时,逆变器交流输出母线电压降低,输出电流增大。故障清除后,交流母线电压迅速恢复稳定,交流电流、有功功率和无功功率在短暂小幅波动后恢复稳定。

光伏电站在其出口侧发生三相短路故障时,逆变器可在较短的故障区间内以低于额定电压(约 0.4 p. u.) 工况运行,保证光伏电站整体不脱网;逆变器输出电流由于其控制策略的钳制作用,相比其额定电流增加不大(约 1.1 p. u.)。逆变器整体输出有功功率降低(约 0.4 p. u.),符合预先设定的电网故障时光伏电站待机运行状态。虽然光伏逆变器恒功率因数设置,由于实行有功、无功解耦控制,且控制回路维持交流输出电压恒定,因此,光伏逆变器输出无功功率仍会瞬时振荡,逆变器输出电压并非垂直下降。

然而,光伏电站由于其分布式电源的共性,并不具备水电厂、火电厂的电磁暂态和机电暂态特性,不具备调频、调压能力,逆变器输出电压在系统发生故障后迅速降低,不能提供瞬间无功电压支撑,因此,光伏电站必须装设动态无功补偿设备。对于大型风电、光伏电站基地,必须有相应容量的水电厂和火电厂配合才能保证电力系统的安全运行。

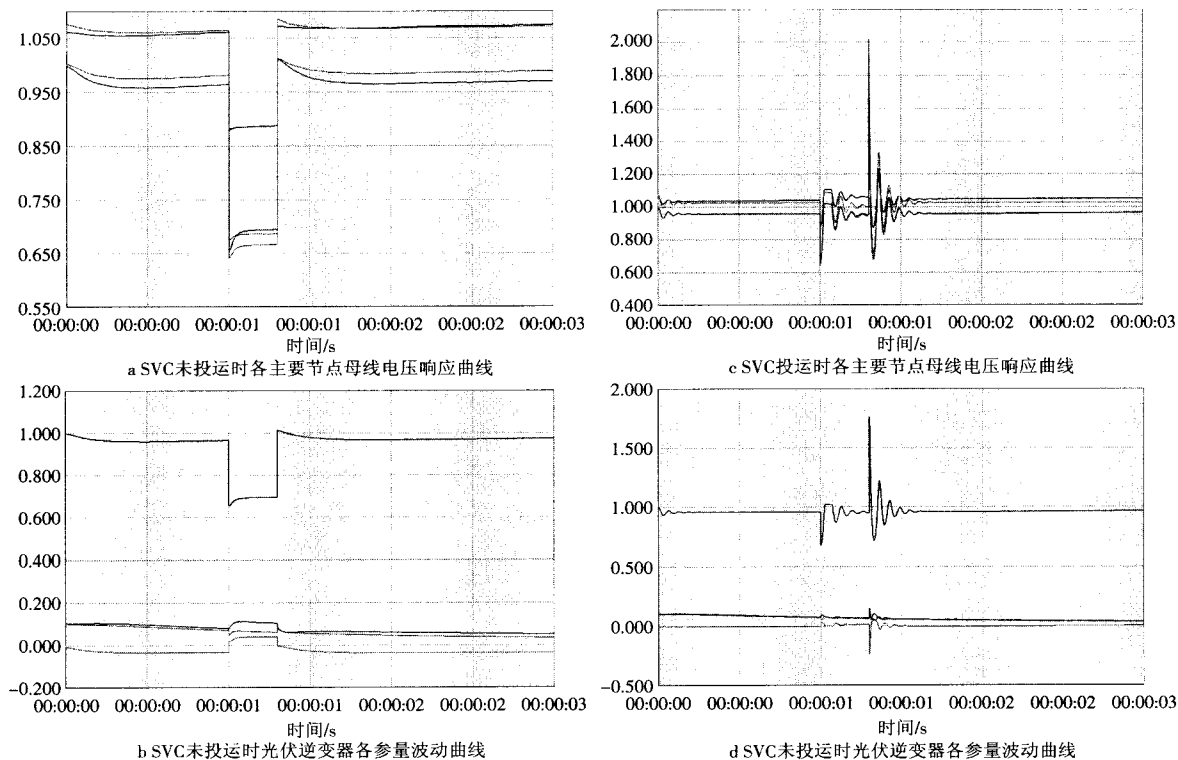


图 8 暂态特性曲线

11 光伏电站运行方式

目前,常见的分布式电源并网系统有恒功率因数型和恒电压型 2 种运行方式。考虑到恒电压运行方式电网侧发生故障时,系统无功缺额增大,分布式电源机端电压降低,需增加无功出力以维持机端电压恒定;分布式电源整体输出视在功率增大,而分布式电源本身提供无功电压支撑能力有限,无功出力增大时相位超前,等效为分布式电源频率增加,进而引起“交-直-交”或“直-交”变换电路控制算法及分布式电源内部保护算法减小其整体有功、无功出力;分布式电源整体出力减小后,系统无功缺额进一步加大,分布式电源需增加更大无功出力。因此,恒电压运行模式会引起分布式电源并网“恶性电压崩溃”现象。国内外分布式电源并网事故,多数属于此种“恶性电压崩溃”造成。

鉴于分布式电源低电压穿越要求与分布式电源本身控制算法间的矛盾,而分布式电源自身控制算法可以保证机端电压近似恒定,因此,该工程光伏电站采用恒功率因数运行模式。

12 结论

光伏电源作为大型分布式供电系统,是一个典型的离散控制系统。本文就光伏电源内部工作原理

(上接第 62 页)伺服阀泄漏的可能。

(2)溢流阀解体检查发现,调节用弹簧已断裂,弹簧弹性不足,造成溢流阀调整部件全关时仍有部分油流通过节流口流出,致使系统压力降低。

(3)将换下的伺服阀(共 8 个)送上海鹏宇科技发展有限公司校验、维修,其中 7 个伺服阀力矩马达弹簧受损,弹簧管对称度偏差 3 ~ 18 μm,已严重超出标准要求。弹簧管对称度超标不但会导致调节不灵敏,而且会使伺服阀阀芯不居中而关闭不严,伺服阀内漏量增加,严重时会引起系统压力降低。造成伺服阀力矩马达弹簧受损的主要原因是伺服阀卡涩(阀芯不居中),弹簧长时间受到力的作用发生塑性变形或伺服阀使用时间较长达到使用寿命,力矩马达弹簧失效。

(4)查阅机组的运行维护资料,自 1998 年机组 DEH 改造投产至今已有 10 多年,系统内伺服阀只有在操作不动时才进行更换,动作正常的伺服阀从没有进行过校验,而此次出现 EH 油系统压力降低的主要原因是伺服阀力矩马达弹簧受损导致内漏量增加。系统内部的伺服阀没有定期检查校验,内漏的伺服阀没有及时发现处理,随运行时间的延长,内

及大型光伏电站并网问题做了详细研究,着重对光伏系统的建模与分析、接入电网特性相关问题做了分析,该分析同样适用于其他分布式电源。为电网的合理调度和安全经济运行提供理论依据,供今后全国大型光伏电站建设时参考。

参考文献:

[1]鲁华永,袁越,陈志飞,等. 太阳能发电技术探讨[J]. 江苏电机工程,2008,2(1):81-84.
 [2]于静,车俊铁,张吉月. 太阳能发电技术综述[J]. 世界科技研究与发展,2008,30(1):56-59.
 [3]高嵩,侯宏娟. 太阳能热发电系统分析[J]. 华电技术,2009,31(1):70-74.
 [4]曲学基. 太阳能发电技术方兴未艾[J]. 电源技术应用,2008(9):34.
 [5]宿建峰,李和平,贡小银,等. 太阳能热发电系统的发展现状及主要问题[J]. 华电技术,2009,31(4):78-82.
 [6]胡寅. 太阳能发电系统相关技术方案设计[J]. 上海建设科技,2009(1):12-15.
 [7]王志刚. 太阳能光伏发电系统控制方案浅析[J]. 华电技术,2010,32(4):18-19.

(编辑:白银雷)

作者简介:

党锁刚(1976—),男,甘肃玉门人,助理工程师,从事新能源项目管理方面的工作。

漏的伺服阀逐渐增多,泄漏量逐渐增加,最终引起系统压力降低。

4 处理效果

2007 年 11 月 15 日, #1 机组小修后重新启动, EH 油系统压力 14.5 MPa,油泵电机电流 23 A。

机组至今已运行近 2 年, EH 油压及油泵电机电流均正常。

5 结束语

(1)火电机组 EH 油系统压力出现缓慢降低时,应首先判断是否是由于伺服阀故障引起。

(2)EH 油系统设备精密,特别是各伺服阀及电磁阀受现场检修条件的限制,缺陷不容易被发现。因此,对伺服阀及其他电磁阀应定期(每个大修周期)进行检查校验,发现问题并及时处理,以保证整个机组稳定运行。

(编辑:刘芳)

作者简介:

吕富周(1969—),男,山东潍坊人,工程师,从事汽轮机检修与维护方面的工作。

马保会(1973—),男,山东潍坊人,工程师,从事汽轮机检修与维护方面的工作。