

# 某水电站 500 kV 送出线路同期合闸失败 案例分析及处理

雷翔, 旷熊, 瞿大林, 秦帅飞, 罗浩, 赖超

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

**摘要:**电力系统中, 线路电压相量和功角状况作为一组状态变量, 在影响电力系统稳定性的同时又受到网络结构和电力设备运行状态的影响, 是判断电网系统能否稳定运行的重要依据。针对某大型水电站按照调度指令执行送出线路恢复送电操作时, 由于线路开关同期装置两侧采样点功角差偏大导致同期合闸失败的案例进行分析。

**关键词:**同期合闸; 功角; 有功调整

**中图分类号:** TV74; U215; B025.4

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2021)04-0129-04

## Analysis and Treatment of Failure Case of 500 kV Transmission Line of a Hydropower Station

LEI Xiang, KUANG Xiong, QU Dalin, QIN Shuaifei, LUO Hao, LAI Chao

(Yalong River Hydropower Development Co. LTD, Chengdu, Sichuan, 610051)

**Abstract:** As a group of state variables of the stable operation in the power system, line voltage phasor and power angle on one hand affects the stability of power system, and on the other hand they are affected by the network structure and the running state of electrical equipment. They are the important basis to judge whether the power system can run stably. In this paper, the author analyzes a case happened on a large hydropower station where the synchronization closing fails due to the large power angle difference between the sampling points on both sides of the line switch synchronization device when executing the transmission line recovery operation in accordance with the dispatching instruction.

**Key words:** synchronous closing; angle; active power adjustment

## 0 引言

电力系统对输电线路的同期合闸操作有很高的要求, 若操作不当会导致线路非同期合闸, 系统将会产生电压波动甚至系统振荡, 危及系统的稳定运行。同时还会产生较大的冲击电流和电磁转矩, 冲击电流将对发电机定子端部绕组产生强大的应力, 电磁转矩将对发电机轴系统产生强大的扭应力, 对发电设备造成疲劳损耗, 甚至导致大轴断裂, 缩短其有效寿命。线路开关的同期合闸对于维持电网稳定性, 保证电站长期健康的经济运行具有重大意义。

发电机功角信息常用于电网运行过程中的稳定状态分析, 尤其是在故障条件下的动态安全分析, 使调控人员可以实时地了解系统的安全稳定程度, 在必要时采取强制措施进行预防控制, 如切机、甩负荷、投电气制动等手段, 以防止系统失稳<sup>[1]</sup>。

## 1 线路同期合闸影响因素

电力系统中线路开关的同期合闸主要依据开关两侧的电压相角、频率和幅值三个要素的信息比对。以下主要从电力系统中现有的线路同期合闸两种方式以及发电机功角状况对输电线路功率的影响两个方面进行阐述。

### 1.1 线路同期方式

(1) 准同期方式。准同期合闸: 在发电机并网之前已投入励磁, 在满足同期的前提下, 合上发电机出口开关或者线路开关。满足同期要求:

①待并网发电机机端电压幅值与运行系统电压幅值相等;

②待并网发电机机端电压相序与运行系统电压相序一致;

③待并网发电机机端电压相位与运行系统电压相位相同;

④待并网发电机频率与运行系统频率一样。

在实际运行中,很难同时满足同期并列的理想条件,事实上也没有必要<sup>[2]</sup>。通常调度规程会对同期两侧电压幅值差、相位差和频率差设置一套范围合理的定值。

准同期合闸的特点在于合闸瞬间定子电流接近于零。其优点为发电机与系统并列运行时产生的冲击电流小,不会造成系统电压的波动,但其缺点在于同期时间长。准同期合闸又可分为自动准同期和手动准同期两种。现有的大、中型发电厂的发电机出口开关以及送出线路开关多采用自动准同期方式进行并网<sup>[3]</sup>。

(2)自同期方式。自同期合闸:在发电机转速至接近系统同步转速时,直接将未加励磁的发电机投入系统,再给发电机加上励磁,在水轮机或者汽轮机转矩的作用下将发电机拉入同步。与准同期刚好相反,虽然该同期方式并网速度快,不会有非同期合闸的风险,但是合闸瞬间会产生比较大的冲击电流,对系统会造成电压波动。

## 1.2 线路功率与功角的关系

功角在空间上定义为发电机端电压  $U$  和激磁电动势  $E_0$  之间的相位差,在数值上功角  $\delta$  也是发电机内功率因数角  $\Psi_0$  和功率因数角  $\varphi$  的差值,即隐极同步发电机功角相量图(图 1)中的  $\delta$  角。发电机有功功率或者无功功率与功角之间的关系定义为发电机功角特性。发电机作为电力系统中不可或缺的一环,其功角状况的分析是判别电力系统稳定性的重要参数。其功角特性方程为:

$$P = \frac{E_0 U}{X_S} \sin \delta \quad (1)$$

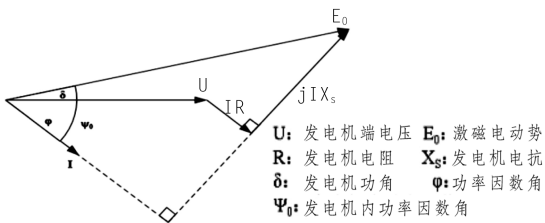


图 1 隐极同步发电机功角相量图

由于发电机功率相对系统功率而言很小,为了便于分析,可将此类简单电力系统视为单机无穷大<sup>[4]</sup>系统。该系统模型的特点为线路电抗远大于线路电阻,线路功角  $\delta$  即为线路首末端电压的相角差。隐极同步发电机的直轴电抗  $X_d$  及交轴电抗  $X_q$  满足条件  $X_d = X_q$ , 单机无穷大系统及其

等值模型见图 2, 相量图见图 3。其中  $X_\Sigma = X_d + X_{T1} + X_L + X_{T2}$ 。

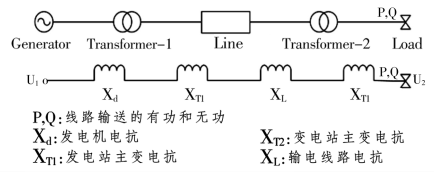


图 2 单机无穷大系统及其等值模型

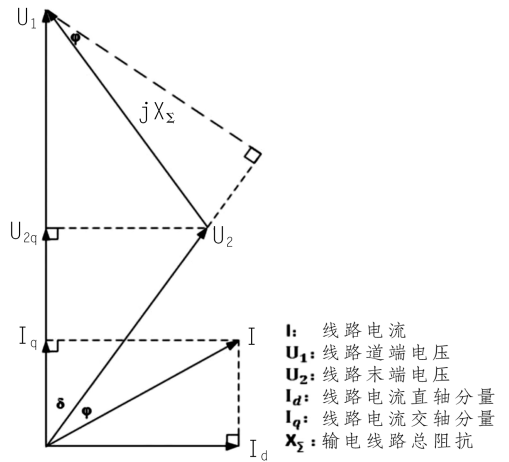


图 3 单机无穷大系统相量图

根据图 3 相量关系可知,单机无穷大系统有以下关系:

$$P = U_1 + jIX_\Sigma \quad (2)$$

线路首段电压  $U_1$  处的功率为:

$$P_{U_1} = U_1 I \cos(\delta + \varphi) \quad (3)$$

又由相量图可知:

$$U_1 \sin \delta = IX_\Sigma \cos \varphi$$

$$U_1 \cos \delta = U_2 + IX_\Sigma \sin \varphi$$

即:

$$I \cos \varphi = \frac{U_1 \sin \delta}{X_\Sigma} \quad (4)$$

$$I \sin \varphi = \frac{U_1 \cos \delta - U_2}{X_\Sigma} \quad (5)$$

联立公式 3~5 可得线路功率传输方程:

$$P_{U_1} = \frac{U_1 U_2}{X_\Sigma} \sin \delta \quad (6)$$

## 2 案例现象

某大型水电站共安装有 6 台立轴式水轮发电机组,采用发变组单元接线,单机额定出力为 600 MW,总装机出力为 3 600 MW。其 500 kV 电气一次设备由 500 kV GIS、500 kV GIL 及其附属

设备组成,主接线采用 4/3 接线方式,共 3 条送出线路,某水电站 500 kV 一次部分主接线见图 4。  
3/2 接线方式的 500 kV 系统,同期点仅设置在边

开关,中开关不设同期点。4/3 接线方式的 500 kV 系统同期点设置在所有 500 kV 开关处<sup>[5]</sup>。  
该电厂共设 18 个同期并列点,包括 12 个

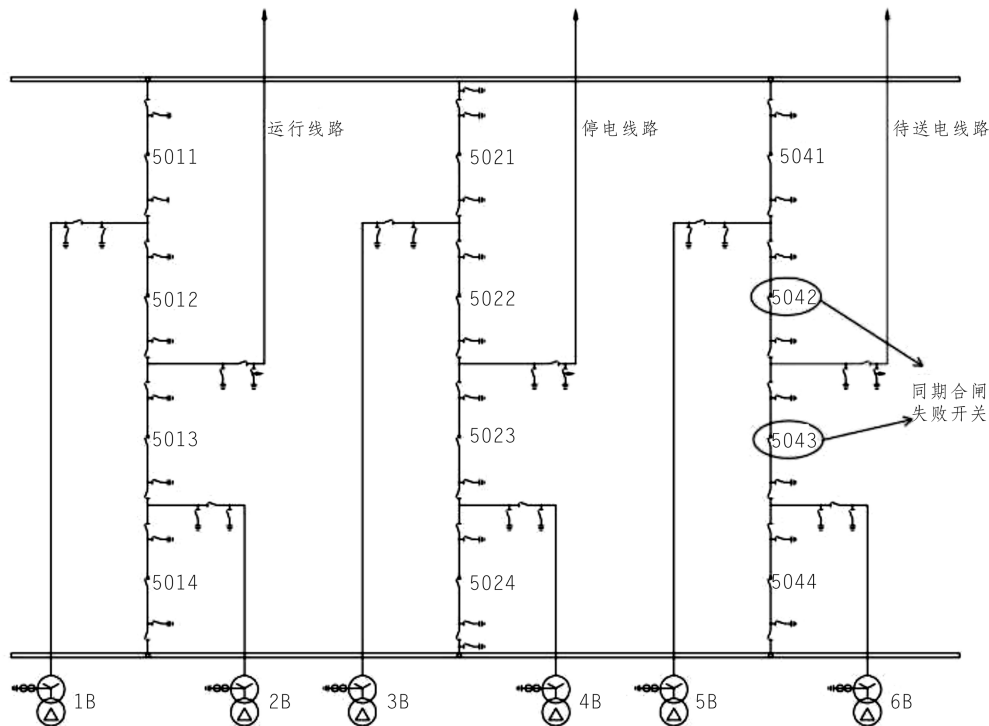


图 4 某水电站 500 kV 一次部分主接线

500 kV 断路器同期并列点和 6 个发电机出口断路器同期并列点。每台机组设置一套发电机出口断路器同期装置,GIS 每串开关共用一套同期装置。同期装置由数字式同期装置、电压/频率/滑差表、同期检查继电器及相关操作把手组成。机组同期装置具有测量、电压匹配和频率匹配、并列条件监测、并列指令生成的功能,能实现发电机与电网的自动或手动同期和并列。GIS 同期装置具有测量、同期条件监测、合闸指令生成的功能,能实现 GIS 开关的自动或手动同期合闸。

适时为配合电网侧相关改造工作,仅第 1 条送出线路运行,第 2 条和第 3 条送出线路陪停。500 kV 各串均合环运行,全厂总有功 2 360 MW。

第 3 条线路送电操作时,在监控系统上方线路开关 5042 同期合闸命令后,线路开关 5042 未能正常合闸,随即发令试合另一线路开关 5043,5043 开关仍未能合闸。现场检查确认 5042、5043 开关未能正常合闸原因是同期装置两侧采样点相角差偏大,相角差值达到 11.2°,大于同期装置整定值 10°。同期装置两侧电压相量数据见表 1。

表 1 电压相量数据

| 通道            | 实部        | 虚部        | 向量                          |
|---------------|-----------|-----------|-----------------------------|
| 5B 进线电压 $U_a$ | 79.889 V  | -0.000 V  | 56.490 V $\angle$ -0.000°   |
| 5B 进线电压 $U_b$ | -40.174 V | -69.322 V | 56.655 V $\angle$ -120.094° |
| 5B 进线电压 $U_c$ | -39.758 V | 69.262 V  | 56.471 V $\angle$ 119.857°  |
| 线路电压 $U_a$    | 78.352 V  | -15.386 V | 56.461 V $\angle$ -11.110°  |
| 线路电压 $U_b$    | -52.445 V | -60.160 V | 56.434 V $\angle$ -131.081° |
| 线路电压 $U_c$    | -25.882 V | 75.516 V  | 56.447 V $\angle$ 108.918°  |

### 3 案例分析

由于电厂功率相对系统功率而言很小,可将此时系统等效为单机无穷大系统。此时根据线路

功率特性方程,线路有功  $P$ ,与线路阻抗  $X_\Sigma$ 、线路两端电压  $U_1$ 、 $U_2$  和相角差  $\delta$  存在公式 6 所示关系,经过变形可以得到公式 7:

$$\delta = \arcsin \frac{PX_{\Sigma}}{U_1 U_2} \quad (7)$$

根据公式6可知,若要改变同期装置两侧相角差值 $\delta$ ,可采取以下三种方式:

- (1)调整500kV母线电压 $U_1$ 、 $U_2$ 。
- (2)改变同期装置两侧相角差定值。
- (3)调整全厂总有功 $P$ 。

根据以上分析,在案例的实际处理中有以下过程。

## 4 案例处理

### 4.1 调整500kV母线电压

由公式7可知,假设 $PX_{\Sigma}$ 为常数,线路功角 $\delta$ 与电站侧母线电压 $U_1$ 之间呈反相关,能通过提高500kV母线电压以缩小同期装置两侧相角差。据此值班人员计划采用增加全厂无功功率的方式来调整500kV母线电压。由于电站500kV母线电压控制范围为532~541kV,值班人员将500kV母线电压由537kV增加至540kV左右,现地检查同期装置两侧相角差几乎没有变化。因为电压可调节范围较小,对线路功角影响也比较小,故该方法非最优处置,将其排除。

### 4.2 修改同期装置两侧相角差定值

由于5042、5043开关合闸不成功的直接原因是同期装置两侧采样点相角差高于定值,因此修改定值可以快速满足5042、5043开关的同期合闸条件。通过查询往年线路恢复送电时同期装置两侧相角差值平均为 $1^{\circ}$ ~ $2^{\circ}$ ,当前相角差值为 $11.2^{\circ}$ ,偏差较大。若仅通过修改定值进行线路恢复,送电操作可能因为合闸冲击电流过大,导致保护装置误动作,且当前仅有单回线路运行,保护一旦误动,全站对外送出通道中断风险骤增。因此修改同期装置定值风险较高,该方法排除。

### 4.3 调整全厂有功出力

由公式7可知,假设 $U_1$ 、 $U_2$ 和 $X_{\Sigma}$ 为常数,线路功角 $\delta$ 与电站有功功率 $P$ 之间呈正相关,能通过减少电站有功功率来缩小同期装置两侧相角差。准同期合上线路开关5042、5043前,全厂总有功为2360MW,同期装置两侧相角差为 $11.2^{\circ}$ 。代入公式7进行计算,可得到:

$$\frac{U_1 U_2}{X_{\Sigma}} = \frac{2360}{\sin 11.2^{\circ}} \quad (8)$$

若需要将同期装置两侧相角差值 $\delta$ 控制在

$10^{\circ}$ 以下,将控制目标代入公式7,得到:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_{\Sigma}} \sin 10^{\circ} \quad (9)$$

联立公式8和公式9即得:

$$P = 2111.8 \text{ MW}$$

综上所述,线路开关5042、5043检同期合闸的必要条件是全厂总有功不能超过2111.8MW。若再考虑调节裕度,值班人员申请调度同意将全厂总有功降低至1760MW。

通过手动录波的方式,采集有功调节过程中的同期装置两侧的电压数据,绘制得到同期装置两侧相角差与全厂总有功的实时变化,见图5。

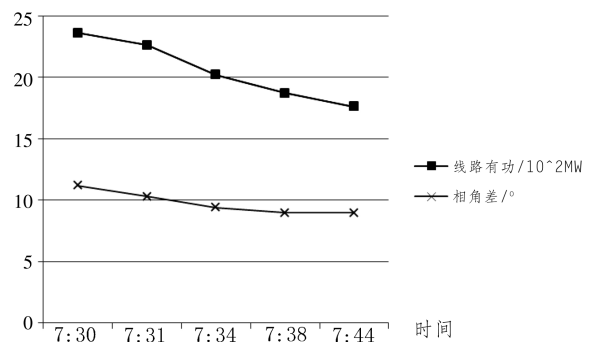


图5 同期装置两侧相角差及全厂总有功的实时变化

通过图5的数据可以看出,当全厂总有功下降至2021MW时,同期装置两侧相角差已经下降至 $9.39^{\circ}$ ,与理论计算值很接近。

## 5 结语

经过理论计算与实际论证,通过降低全厂总有功的方式可以减小同期装置两侧相角差,从而使同期装置满足动作条件,最终使线路开关自动准同期合闸成功。

为提高线路开关自动准同期合闸操作的成功率,可以对监控操作系统以及线路合闸操作前的有功调节进行以下优化:同期装置以及现地LCU应具备计算开关两侧电压相位差是否满足同期合闸条件的功能,并能向监控系统发送相关遥信信号,以便值班人员能直观地进行操作判断。当电厂单条线路运行且线路有功较大时,为防止其他线路开关同期合闸时冲击电流过大影响系统安全,建议线路恢复送电前,结合线路功角与线路有功关系对全厂有功功率进行核算。考虑到测量和计算误差的影响,其他线路恢复送电前可申请调

(下转第140页)

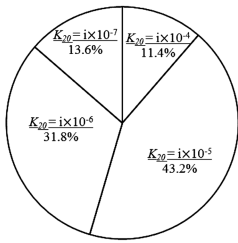


图8 黏性土渗透系数占比分布图

均值为 14 kPa。φ=16.6°~29.0°,平均值为 24.4°。其中 φ=22°~25.0°, 22 组,占统计组数的近 50%,φ=25°~29.0°, 20 组,占统计组数的近 45%。表明覆盖层深部黏土具中~低抗剪强度。

4 结 语

依托长河坝、猴子岩、泸定、硬梁包、ML 工程等大型水电工程,搜集、整理了西南地区跨流域的覆盖层勘探试验资料,统计分析了覆盖层深部黏土的物理力学性质以及相关指标的关联。

统计分析成果表明:尽管西南地区跨流域的覆盖层深部黏土在矿物成分、颗粒组份等存在差异,由于其形成原因的相似性(较长历时的水力搬运、冲刷、浸泡、静水沉积以及上覆荷重等外力作

用),深部黏土在可塑性、常规的压缩、渗透、强度等特性方面呈现出一定的相似性。深部黏性土大部分具中~低压缩性、弱~极微透水与中~低抗剪强度的工程性质。提出的物理力学试验统计值可为后续相关工程地质评价或基础处理提供一定参考。

参考文献:

[1] 彭士标,袁建新,王惠明. 水力发电工程地质手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011. 12.  
 [2] 殷宗泽,龚晓南. 地基处理工程实例. 北京:中国水利水电出版社,2000.  
 [3] 杨进良. 土力学[M]. 第三版. 北京:中国水利水电出版社,2006.  
 [4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京:中国水利水电出版社,1996.  
 [5] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

作者简介:

罗 欣(1987-),男,四川广安人,工程师,从事土力学试验研究工作;  
 孙睿达(2000-),男,四川成都人,从事材料研究工作;  
 王晓龙(1989-),男,河北秦皇岛人,工程师,从事土力学试验研究工作。

(责任编辑:吴永红)

(上接第 128 页)

参考文献:

[1] 李云贵. 建筑工程设计 BIM 应用指南(第 2 版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.  
 [2] 张吕伟,蒋吕俭. 中国市政设计行业 BIM 指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.  
 [3] 何关培. BIM 总论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
 [4] 霍海娥. Autodesk Revit MEP 管线综合设计应用[M]. 北京:科学出版社,2019.

(上接第 132 页)

度将线路总有功降至目标有功功率以下并留出一定裕度,可以为理论计算值的 80%~90%。

参考文献:

[1] 许磊,王昭雷,张会贤. 500 kV 某变电站角测量装置频率跳边故障分析[J]. 科技创新与应用,2016(24):209.  
 [2] 苏茂,何伟. 浅析相角差对同期并列的影响[A]. 中国水力发电工程学会梯级调度控制专业委员会. 梯级调度控制研究论丛——2012 年学术交流论文集(下册)[C]. 中国水力发电工程学会,2014:10.  
 [3] 李忠义. 发电机及厂用电同期系统概论[J]. 中国电力教育,2010(S1):380-382.  
 [4] 刘天琪,邱晓燕. 电力系统分析理论[M]. 北京:科学出版社,2005:303.  
 [5] 贺卫芳,张其国. 500 kV 变电站同期系统全过程技术管理

[5] 幸智,孙文彬,刘丁,等. 基于 Revit 平台的阀门参数化建族方法,CN107688710A[P].

作者简介:

杜沛林(1989-),男,陕西西安人,工程师,硕士学位,从事水电站电气一次设计工作;  
 庞元劼(1988-),男,四川成都人,工程师,硕士学位,从事水电站电气一次设计工作;  
 黄 凯(1982-),男,四川夹江人,高级工程师,学士学位,从事水电站电气一次设计工作。

(责任编辑:吴永红)

[J]. 内蒙古石油化工,2010,36(09):85-86.

作者简介:

雷 翔(1997-),男,四川新津人,本科,从事水电站运行管理工作;  
 旷 熊(1990-),男,四川会理人,本科,从事水电站运行技术与管理工  
 作;  
 瞿大林(1991-),男,四川彭山人,本科,从事水电站运行技术与管理工  
 作;  
 秦帅飞(1993-),男,河南汝州人,本科,从事水电站运行技术与管理工  
 作;  
 罗 浩(1994-),男,重庆黔江人,本科,从事水电站运行技术与管理工  
 作;  
 赖 超(1993-),男,四川绵阳人,本科,从事水电站运行技术与管理工  
 作。

(责任编辑:吴永红)