

Innovation and Engineering Practice of “Zero Cable” Transformer Replacement Technology in 110kV Substations—A Case Study of the #3 Main Transformer Retrofit in a 110kV Substation

Zunbo Xiao

Dongkou County Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410029, China

Abstract

In response to the power supply safety hazards caused by phase sequence errors in the #3 main transformer of a 110kV substation, this paper breaks through the traditional technical understanding that “cables must be used to complete the main phase transformation” and proposes an innovative scheme of “zero cable” phase transformation based on the optimization of existing equipment wiring. By analyzing the wiring principle of the main transformer and the impact mechanism of phase sequence errors, a technical path for high-voltage side wiring adjustment and secondary circuit phase verification has been designed, which does not require the addition of 110kV cables and related accessories, but only achieves phase sequence correction by optimizing the internal wiring logic. Engineering practice has shown that this solution not only solves the problems of high cost, long construction period, and high safety risks of traditional cable commutation schemes, but also directly saves more than 500000 yuan in engineering costs, shortens the construction period by 60%, provides an economical and efficient solution for phase sequence adjustment of main transformers in similar substations, and has important promotion and application value.

Keywords

110kV substation; Main transformer; Zero cable commutation; Phase sequence adjustment; technological innovation

110kV 变电站主变“零电缆”换相技术创新与工程实践——以某 110kV 变电站 #3 主变改造为例

肖尊波

国网湖南省电力有限公司洞口县供电分公司。中国·湖南长沙 410029

摘要

针对某110kV变电站#3主变相序错误导致的供电安全隐患，突破传统“必须采用电缆才能完成主变换相”的技术认知，提出一种基于原有设备接线优化的“零电缆”换相创新方案。通过分析主变接线原理、相序错误影响机制，设计了高压侧接线调整+二次回路核相验证的技术路径，无需新增110kV电缆及相关附件，仅通过优化内部接线逻辑实现相序校正。工程实践表明，该方案不仅解决了传统电缆换相方案造价高、施工周期长、安全风险大的问题，还直接节约工程费用50余万元，缩短施工工期60%，为同类变电站主变相序调整提供了经济高效的解决方案，具有重要推广应用价值。

关键词

110kV变电站；主变；零电缆换相；相序调整；技术创新

1 引言

110kV 变电站作为区域电网的核心枢纽，其主变设备的安全稳定运行直接关系到供电可靠性。在变电站建设，主变相序错误是一类典型的隐蔽性故障，易导致三相旋转设备

反转、计量装置误差超标、继电保护误动等连锁问题，严重时引发电网环短路事故。传统解决主变相序问题的技术方案普遍采用“110kV 电缆敷设+接线重构”模式，它基于“高压侧相序调整必须依赖电缆”的传统认知，虽能实现相序校正，但存在工程造价高、施工周期长等弊端。

某 110kV 变电站在一次越级跳闸事件后，才发现 #3 主变存在高压侧相序接反。若采用传统电缆换相方案，需敷设 110kV 电缆 180m，估算工程总费用达 52 万元，且施工周期需 20 天，将造成较大的供电压力。本文基于本人主持的

【作者简介】肖尊波（1975-），男，中国湖南邵阳人，本科，工程师，从事电网设备运维检修、生产现场质量管理及技术创新研究。

该变电站 #3 主变改造工程，通过深入分析主变接线组别特性、相序调整原理，创新提出“零电缆”换相技术方案，即通过优化一次接线方式、重构二次回路核相逻辑，无需新增 110kV 电缆即可实现相序校正。本文详细阐述该方案的设计原理、实施步骤、技术验证及效益分析，为同类工程提供技术参考。

2 工程概况与现存问题

2.1 变电站基本情况

某 110kV 变电站始建于 2008 年，与相邻发电站的户外开关场地接壤，且共用 110kV 母线，有主变 3 台。#1、#2 主变为发电站所有，建设在前，#3 主变为变电站所有，为 2008 年新建变电站时安装，型号为 SFS8-25000/110，额定电压 $110 \pm 2 \times 2.5\% / 38.5 \pm 2 \times 2.5\% / 11kV$ ，接线组别为 YN, yno,d11。

#3 主变高压侧与原有 #1、#2 主变高压侧，是“面对面”安装状态。#3 主变从 110kV 母线引线接入时，高压侧相序被动接反，主变标注的 A 相只能接入电网的 C 相、标注的 C 相只能接入电网的 A 相。原差动保护装置属于输入系数调整差流的设置，投运后一直未引发主变差动保护动作。

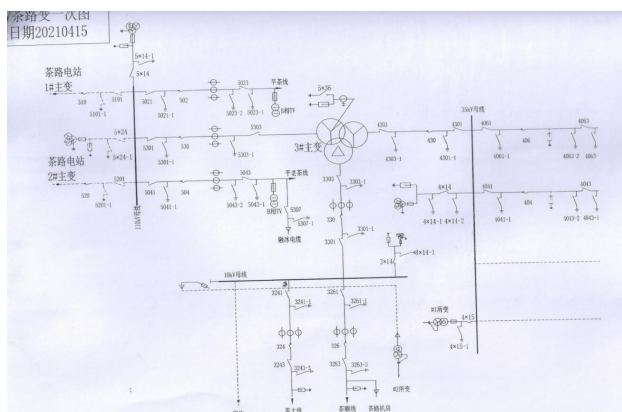


图 1

2.2 相序问题的发现与危害

2020 年初该变电站实施二次系统综合自动化系统改造，竣工投运不久后所供带的 10kV 线路发生短路故障，造成 #3 主变两套差动保护未能躲过穿越性故障、与 10kV 线路保护同步出口动作，跳开主变三侧断路器。二次保护人员，发现差动定值中主变接线组别设置 YN, yno,d11 与实际不符。主变因高压侧相序接反后，运行组别为 YN, yno,d1。考虑纠正相序只能通过敷设电缆才能完成，二次保护人员接线组别定值，由 Y/Y/D-11 修改为 Y/Y/D-1。该变电站与相邻变电站的 10kV 线路不能合环、同一相位总存在 60° 相位差的原因也水落石出。

这种主变高压侧的相序错误，会引发三大安全隐患：

(1) 继电保护误动风险：相序错误导致复合电压闭锁元件中负序电压元件长期开放，使复压闭锁过流保护退化为

纯电流保护，灵敏度异常升高，易发生误动作；

(2) 设备运行异常：10kV 侧三相异步电动机（如电容器组风机、排水泵）出现反转现象，机械磨损加剧；

(3) 计量精度偏差：10kV 侧无功电能表因反相序运行，计量误差超出允许范围（实测误差达 -12.8%）。

2.3 传统解决方案及其局限性

针对上述相序问题，传统技术解决路径为“110kV 电缆敷设 + 相序重构”，具体方案为：从 110kV 隔离开关 5303 靠主变侧拆除连接 #3 主变架空线路，敷设单根 60m 长度 110kV 单芯电缆至 #3 主变高压侧，通过电缆重新接线调整 A、C 相序。该方案的局限性主要体现在三方面：

(1) 工程造价高昂：根据 110kV 输电工程参考造价标准，YJLW02 型 110kV 单芯电缆 180 米的综合造价为 33 万元，加上电缆附件、试验检测等费用，总造价约 58 万元；

(2) 施工周期长：电缆方案涉及项目申报、招标采购、物资运输、基础施工、耐压试验等多个环节，预计施工周期 20 天，期间 #3 主变需全停，造成供电压力激增；

(3) 运维工作量增加：110kV 电缆投运后需定期巡视与测温，且电缆接头制作质量直接影响供电可靠性，存在绝缘击穿隐患。

3 “零电缆”换相技术方案设计

3.1 技术创新原理

本方案的核心创新点在于突破“高压相序调整必须依赖电缆传导”的传统认知，推翻 110kV 母线同一间档难以实施两组引下线同时调换 A、C 相的思想禁锢，系统性地统筹考虑一次设备与二次设备的同步调整、考虑发电站设备与变电站设备的同异之处，提出“5301 隔离开关与 5×24 母线 TV（属发电站设备）引下线同步换相”的方案，并对发电站侧因 5×24 母线 TV 换相后造成的影响进行全面评估、再提出针对性的应对措施。

该方案无需新增外部电缆，仅通过调整 #3 主变间隔与母线的连接相位，即可实现相序校正，使主变低压侧（d 接）比高、中压侧（Y 接）的相位差，从超前 30° 调整至滞后 30°，主变接线组别从之前运行的 YN, yno,d1 恢复至 YN, yno,d11（与铭牌一致），相邻变电站的 10kV 线路即可消除 60° 相位差实现合环运行。

3.2 方案具体设计

3.2.1 基准核相定标

以电源线路 504 平老茶线为基准，确认母线相序与线路相序一致后，交换 5301、4301、3301 三组刀闸与母线引下线的 A、C 相位置，B 相保持不动。

3.2.2 关联设备联动调整

为避免引下线交叉，同步调换发电站 5×24、变电站 4061、3261 刀闸引下线，再在 406 线路 #10 拐角杆塔、326 线路 #1 杆分别实施 A、C 两相跳线换相，确保线路维持原有相序，避免“局部调相引发全局紊乱”。

3.2.3 标识与二次回路适配

一次设备可视化：对530、430、330、5×24、406、326间隔的一次设备及#3主变三侧瓷瓶、10kV母排重刷色漆，调换黄、红色漆涂刷位置，直观呈现相序变化。

二次回路精准矫正：调整5处16组TA二次回路及发电站电压回路的a、c相接线路，包括530TA有4组电流绕组、430TA有3组电流绕组、330TA有4组电流绕组、406TA有3组电流绕组、326TA有2组电流绕组，均需交换对应的TA二次回路a、c相接线路位置。

在发电站5×24二次端子箱，更换保护、测量、计量3组电压回路a、c接线位置，更改开口Δ绕组连线方式，维持a头c尾输出。

恢复#3主变2套差动保护中接线组别的定值，为铭牌标注的“Y/Y/D-11”，让保护装置与实际接线真正匹配。

3.2.4 投运验证闭环

换相后同步开展两项关键验证：一是核相确认35kV及10kV系统相位正常，二是带负荷测试#3主变差流数据是否正常，最终在10kV联络开关处进行核相。

整个方案采用“停电-调整-核相-送电-验证”施工流程，施工过程中执行“三检制”（自检、互检、专检）全过程质量管控，坚持“能调引线不换电缆、能利旧不新增”原则，总费用控制在1万元以内，不到原电缆方案的2%，更避免了复杂的电缆施工与后期运维负担。

4 方案实施与效果验证

4.1 实施过程

本工程于2024年11月实施，总施工周期4天，较传统方案缩短16天。实施过程中，重点完成三项核心工作：

(1) 高压侧接线调整：组织4名技术人员同步开展A、C相接线路拆除与重构，16日完成接线调整及绝缘测试，测试结果显示各相绝缘电阻均 $\geq 1500M\Omega$ ，满足要求；

(2) 三级核相验证：高压侧A、B、C相相位差分别为 121.3° 、 118.7° 、 120.0° ，低压侧核相相位差均在 119° - 121° 之间，联络点核相相位一致；

(3) 试运行验证：进行空载及带负荷试运行，相关数据显示正常。

4.2 技术效果验证

4.2.1 相序正确性验证

通过无线核相仪实测，#3主变三侧相序均为标准正相序(A→B→C)，相位差对称度 $\leq 1.3\%$ ，满足《电力系统相序和相位校验规程》(DL/T559-2019)要求。

4.2.2 保护与计量系统验证

(1) 保护系统：模拟线路短路故障，差动保护动作时间为0.03s，距离保护动作时间为0.12s，均符合设计要求，无误动、拒动现象；

(2) 计量系统：10kV侧无功电能表计量误差为

+0.8%，满足《电能计量装置技术管理规程》(DL/T448-2010)规定的 $\pm 2\%$ 误差要求。

4.3 工程质量验收

2024年12月，组织专家进行工程质量验收，验收结论为：#3主变“零电缆”换相工程施工工艺规范，相序调整正确，设备运行稳定，技术指标全部达标，工程质量合格。

5 经济效益与社会效益分析

5.1 直接成本节约

传统电缆换相方案与“零电缆”方案造价对比，见表1

费用项目	传统电缆方案 (万元)	零电缆方案 (万元)	节约费用 (万元)
110kV电缆及附件	42.0	0.0	42.0
接线与施工费	4.5	0.7	3.8
试验检测费	3.2	0.2	3.0
其他费用	2.3	0.1	2.2
总造价	52.0	1.0	51.0

由表1可知，“零电缆”方案直接节约工程费用51.0万元，成本节约率达98%。

5.2 间接效益

(1) 停电损失减少：预计减少因负荷转供线损10万kWh，按售电单价0.65元/kWh计，减少损失约6.5万元；

(2) 运维成本降低：110kV电缆年均运维费用约0.8万元，“零电缆”方案无需新增电缆，按#3主变剩余运行年限20年计算，累计节约运维费用16万元。

5.3 社会效益

(1) 提升供电可靠性：施工周期缩短60%，减少了线路转供压力，供电可靠率从90.85%提升至99.92%；

(2) 节能环保：无需生产110kV电缆，减少了电缆生产过程中的能源消耗与污染物排放，符合“双碳”目标要求；

(3) 技术示范价值：为一线员工开展提质增效活动提供了经济技术路径，已被“财务家园”进行推介报道。

6 结语

针对某110kV变电站#3主变相序错误问题，本文作者发扬“主人翁”精神，能蹲下身来观察设备细节，静下心来琢磨运行逻辑，从“习以为常”的困境中找到破局点，创新提出“零电缆”换相技术方案，虽不是“高大上”的技术革命，却是“接地气”的精准改良，突破了传统电缆换相的技术局限，为电网安全运行注入“一线视角、实用导向”的基层智慧。

参考文献

- [1] 国家电网有限公司. DL/T 559-2019 电力系统相序和相位校验规程[S]. 北京：中国电力出版社，2019.
- [2] 国家能源局. GB 50545-2010 110kV~750kV架空输电线路设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，2010.
- [3] 南方电网公司. 35-500kV输变电关键工程造价控制线[R]. 2024.