

Analysis and improvement method of three-phase voltage imbalance in photovoltaic power station

Yangyang Wei

China Resources New Energy Investment Co., Ltd. Ningxia Branch, Zhongwei, Ningxia, 755100, China

Abstract

As an important part of renewable energy generation, the stable operation of photovoltaic power station is of great significance to ensure the power quality of the power grid. However, in actual operation, photovoltaic power stations often encounter the problem of three-phase voltage imbalance, which affects the generation efficiency and grid stability. This study uses theoretical analysis and field investigation to identify the causes and use the PSCAD simulation verification. The strategies of uniform transformation, line hanging adjustment and installation of series flexible transmission equipment (such as SSSC) are proposed. Simulation and testing show that these strategies effectively reduce the imbalance degree and improve the power quality. This study provides a new scheme for the stable operation and power quality management of photovoltaic power station, which has theoretical and applied value.

Keywords

three-phase voltage imbalance; PSCAD simulation; uniform conversion transformation; line hanging line adjustment; series type flexible transmission equipment; application value

光伏电站三相电压不平衡原因分析及改善方法

魏阳阳

华润新能源投资有限公司宁夏分公司, 中国 · 宁夏 中卫 755100

摘 要

光伏电站作为可再生能源发电的重要组成部分, 其稳定运行对于保障电网电能质量具有重要意义。然而, 在实际运行中, 光伏电站常遇三相电压不平衡问题, 影响发电效率和电网稳定。本研究通过理论分析与实地调研, 明确成因并利用PSCAD仿真验证。提出均匀换相改造、调整线路挂线及安装串联型柔性输电设备(如SSSC)等策略。仿真与测试表明, 这些策略有效降低不平衡度, 提升电能质量。本研究为光伏电站稳定运行和电能质量管理提供新方案, 具有理论与应用价值。

关键词

三相电压不平衡; PSCAD仿真; 均匀换相改造; 线路挂线调整; 串联型柔性输电设备; 应用价值

1 引言

随着可再生能源需求增长, 光伏电站的电能质量问题备受关注, 尤其是三相电压不平衡。此问题源于光伏电源输出不稳定、电网结构局限、负荷分布不均及线路挂线不合理等因素。为解决此问题, 本文在总结前人研究基础上, 探讨了均匀换相改造、线路挂线调整及串联型柔性输电设备的应用等治理方法。研究旨在为光伏电站提供有效的治理方案, 提高电能质量和运行稳定性, 并为其他可再生能源发电站提供借鉴。未来将继续探索更高效、智能的治理方法。

2 三相电压不平衡原因探究

某光伏电站, 其现有容量 550MW, 通过双回 110kV 同塔线路(长度 67.3km)并入系统 330kV 变电站 110kV 母线。在正常运行时, 光伏电站侧 110kV 母线出现三相电压不平衡, 不平衡度随发电负荷的增大而增大, 最大不平衡度最高达到约 7.64%, 超过国家标准《电能质量三相电压不平衡(GB/T 15543-2008)》规定范围, 不满足电网电能质量标准。

2.1 实际情况分析

根据现场录播数据显示各个电流均未出现明显的负序分量和零序分量, 因此排除不平衡电流源导致三相电压不平衡^[1]; 各时刻电压及电流谐波含量均满足《电能质量公用电网谐波》(GB/T14549-93), 可排除谐波超标电压波形畸变严重导致的三相电压不平衡; 110kV 母线三相电压不平衡度呈现随送出负荷增大而增大的趋势, 可能存在阻抗不平衡问题。

【作者简介】魏阳阳(1988-), 男, 中国陕西渭南人, 本科, 助理工程师, 从事新能源风力发电、光伏发电、电气及自动化技术管理等研究。

2.2 阻抗不平衡问题分析

在排除不平衡电流源和谐波超标因素后,本文进一步分析了阻抗不平衡对三相电压不平衡度的影响。

(1) 110kV 母线三相电压不平衡度呈现随送出负荷增大而增大的趋势,可能存在阻抗不平衡问题。

(2) 光伏电站送出线路采用同塔双回全线不换位方式,两条线路6根导线之间存在互阻抗,必然导致阻抗不平衡。虽然国标《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》(GB50545-2010)规定“110kV 输电线路采用同塔双回方式,线路长度不超过100km,可以不考虑换位”,但对于输送容量和电源特性并未做出详细规定。

(3) 与传统电力系统电源不同,光伏电站外电源特性为可控电流源。当这种可控电流源经过不平衡线路传输时,

不平衡现象将全部表现在线路不平衡压降上。在接入电网较强时,电网电压保持平衡且稳定,但叠加线路不平衡压降后,会导致光伏电站侧三相电压出现不平衡。

2.3 仿真分析

为了验证上述分析,本研究使用 PSCAD 软件搭建了光伏电站并网系统。并网系统模型如图 1-1 所示,光伏电站等效为三相平衡正序电流源,电网等效为三相平衡正序电压源,送出线路采用 PSCAD 内置同塔双回模型。光伏电站送出线路共有 11 中塔型,其中 SZT5、SZCK 和 SDPJ 塔型与其他塔型差异较大,单在整条线路中占比只有 5% 左右,对整条线路阻抗影响不大,因此选取 SJT2 作为仿真塔型参数,如图 1-2 所示。

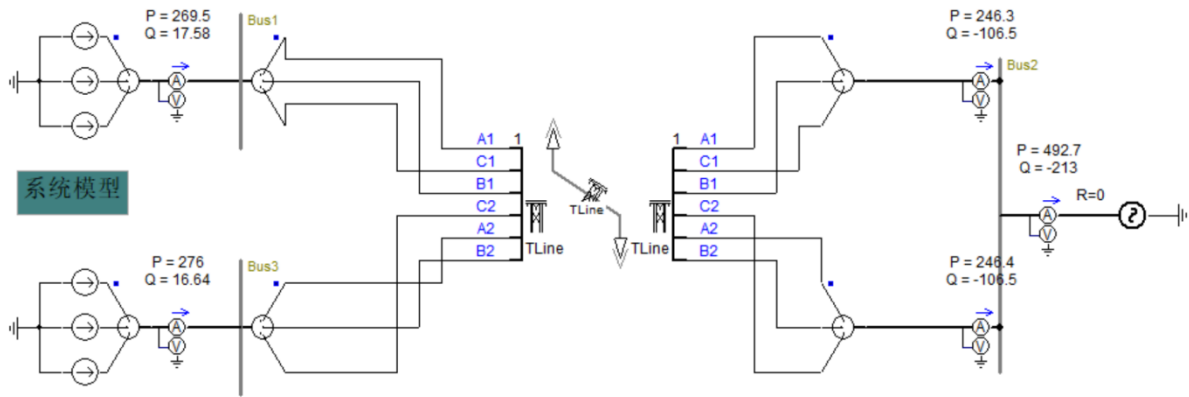


图 1-1 光伏电站并网系统仿真模型

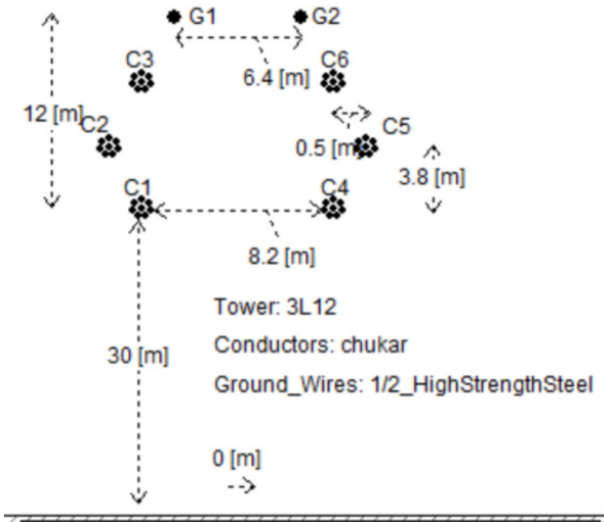


图 1-2 送出线路仿真模型

两条线路送出功率保持一致,对光伏电站不同送出功率工况进行仿真,观察光伏电站 110kV 母线电压不平衡度。

仿真分析显示,光伏电站 110kV 母线电压不平衡度随送出功率增加而加剧,与现场观测趋势相符,但具体不平衡程度存在差异。原因在于仿真基于理想化的同一塔型和均匀

线路走廊设计,而实际线路穿越复杂山地,导线弧垂、杆塔高度各异,加剧了线路阻抗不平衡,导致实际不平衡度高于仿真。尽管如此,仿真结果仍准确反映了不平衡度的变化趋势,对理解问题本质和制定治理策略具有参考价值。

2.4 理论分析

光伏电站送出电流在送出线路上产生的电压降为:

$$\Delta U = Z \cdot I \quad (1-1)$$

其中, $\Delta U = [\Delta U_{1A}, \Delta U_{1C}, \Delta U_{1B}, \Delta U_{2C}, \Delta U_{2A}, \Delta U_{2B}]^T$ 为导线上的压降;

$I = [I_{1A}, I_{1C}, I_{1B}, I_{2C}, I_{2A}, I_{2B}]^T$ 为流过导线的电流;

Z 为 PSCAD 同塔线路模型所导出的同塔线路阻抗矩阵;

对送出线路电压降进行对称分量变换

$$\begin{cases} \Delta U_{120} = M \cdot \Delta U \\ I_{120} = M \cdot I \end{cases} \quad (1-2)$$

其中, $\Delta U_{120} = [\Delta U_{11}, \Delta U_{12}, \Delta U_{10}, \Delta U_{21}, \Delta U_{22}, \Delta U_{20}]^T$ ——线路压降序分量;

$I_{120} = [I_{11}, I_{12}, I_{10}, I_{21}, I_{22}, I_{20}]^T$ ——线路电流序分量;

$M = \begin{bmatrix} E \cdot T_1 & 0 \\ 0 & E \cdot T_2 \end{bmatrix}$ ——对应同塔双回线路对称分量变换矩阵;

将式(1-2)代入式(1-1)得

$$\Delta U_{120} = M \cdot \Delta U = M \cdot Z \cdot I = M \cdot Z \cdot M^{-1} \cdot (M \cdot I) = M \cdot Z \cdot M^{-1} \cdot I_{120} \quad (1-3)$$

光伏电站送出电流只含有正序分量,整理得线路负序电压降为:

$$\begin{cases} \Delta U_{12} = (-1.63 + 1.00i) \cdot I_{11} + (-0.58 - 0.30i) \cdot I_{21} \\ \Delta U_{22} = (-0.58 - 0.30i) \cdot I_{11} + (-0.03 - 1.88i) \cdot I_{21} \\ \Delta U_{10} = (-1.85 - 0.24i) \cdot I_{11} + (-0.86 - 0.46i) \cdot I_{21} \\ \Delta U_{20} = (-1.04 - 0.22i) \cdot I_{11} + (-0.88 - 0.40i) \cdot I_{21} \end{cases} \quad (1-4)$$

光伏电站每回线路输出功率为270MW时,电流为1.35kA,代入公式(1-4)计算得线路1负序电压为3.13kV,线路2负序电压为3.05kV,与仿真结果线路1负序电压3.38kV和线路2负序电压2.91kV基本一致。

由公式(1-4)可知,由于同塔双回线路导线非对称布置导致线路等值阻抗矩阵各相参数差异,流经正序电流 I_1 时,将产生负序电压降和零序电压降,导致光伏电站母线电压 U_s 不平衡^[2]。即使本线路没有电流,另一条线路有电流,也会在本线路产生负序电压降。负序电压降与电流成正比,电压不平衡度随电流增加而增大。

3 研究三相电压不平衡治理方法

3.1 研究送出线路一次全换位

3.1.1 技术原理分析

对某光伏电站送出线路实施换位技术,可以平衡线路阻抗并解决三相电压不平衡问题。以现有线路采用逆相序排列,为优化平衡性,提出逆相序反向换位,即在换位区间内上下层导线互换但相序不变,以显著改善阻抗不平衡,有效缓解或消除三相电压不平衡问题。对送出线路进行一次逆相序反向全换位,相序排布图如图2-1所示。

送出线路分为均等的3段:

第一段杆塔相序排布方式为:A1-C1-B1-C2-A2-B2(1-2-3-4-5-6);

第二段杆塔相序排布方式为:B1-A1-C1-A2-B2-C2(1-2-3-4-5-6);

第三段杆塔相序排布方式为:C1-B1-A1-B2-C2-A2(1-2-3-4-5-6)。

在1.3光伏电站并网模型基础上,对送出线路按照图3-1进行一次逆相序反向全换位。Tline1、Tline2和Tline3线路长度均为23.633km。

光伏电站2条线路送出功率270MW进行仿真,结果表明,送出线路经过一次全换位后,光伏电站母线电压三相不平衡现象消失,电压负序分量和零序分量均降为零。

3.1.2 理论分析

光伏电站送出电流在送出线路上产生的电压降为

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = Z' \cdot I_1 + Z' \cdot I_2 + Z' \cdot I_3 \quad (2-1)$$

其中, ΔU_i 为1段导线上的压降, I_i 为1段流过导线的电流

Z' 为PSCAD同塔线路模型所导出的同塔线路阻抗矩阵,3段导线长度和塔型一致,因此阻抗矩阵相同。

3.2 研究调整线路相序排布和运行方式

=调整送出线路相序,并改变光伏电站母线连接方式及边界条件,在PSCAD中仿真270MW送出功率。结果显示,电压负序分量降至0.7kV,零序分量降至0.8kV,母线电压三相不平衡度显著改善至1%,达到预期。仿真系统调整后,电网侧电流三相平衡,线路间产生负序和零序流,改善了电压不平衡,转移了线路电流不平衡。

3.3 研究不平衡电压补偿装置

3.3.1 技术原理

在线路中串联接入一个结构类似于静止同步串联补偿器(SSSC)或统一潮流控制器(UPFC)的可控电压源,该电压源通过电力电子设备能够生成与线路中不平衡电压大小相等且相位相反的补偿电压,以此对线路的负序电压和零序电压进行有效补偿,从而将光伏电站母线处的电压调整至三相平衡状态。

基于1.2小节所描述的光伏电站并网系统仿真模型,本文在模型中串联接入了一个理想化的受控电压源,具体配置如图2-16所示。在仿真过程中,光伏电站的两条送出线路均以270MW的功率进行运行。在仿真时间的1秒时刻,本文在线路中串联接入了该理想受控电压源,用于对线路的负序电压和零序电压进行补偿。

仿真结果清晰地显示,在受控电压源接入之前(即1秒时刻之前),光伏电站的母线三相电压存在显著的不平衡现象,其中线路1的负序电压为3.38kV,线路2的负序电压为2.91kV。然而,在受控电压源接入并对负序电压和零序电压进行补偿之后(即1秒时刻之后),光伏电站母线的负序电压分量和零序电压分量均被成功地降低至0,三相电压因此重新恢复了平衡状态。

3.3.2 现有技术产品分析

目前,移动式分布潮流控制器(Movable Power Flow Controller,建成MPFC)由若干个分散串联在三相输电线路路上、输出电压可控的电压源换流器单元构成,具有可控串联负序电压补偿功能,在基本结构不变的情况下,对MPFC控制功能调整改进,实现解决电压不平衡目标^[3]。南瑞公司MPFC装置,已于2020年投运于浙江电网湖州220千伏甘泉~祥福双线,容量 $2 \times 30\text{MVA}$ 。

每个MPFC单元采用单相全桥(H桥)电路,由4只全控型电力电子功率器件IGBT为主体,由直流电容器、滤波回路、旁路单元、取能回路、控制单元、必要的电压电流测量元件以及通信模块等组成。MPFC单元接收上层控制器控制指令或根据本地阻抗控制指令等,通过PWM调制算法,生成IGBT驱动信号,将直流电压逆变为幅值可调的交流

流电压,从而向线路中注入幅值可调、相角与线路电流垂直的电压分量,达到改变线路等效阻抗的目的,实现线路的潮流控制。

4 结论

本研究针对光伏电站母线电压三相不平衡问题进行了深入分析,发现该问题主要由同塔双回线路导线的非对称布置导致线路等值阻抗矩阵各相参数存在差异所引起。当光伏电站送出正序电流流经任意一条送出回路时,会在两条回路中产生负序压降和零序压降,进而导致光伏电站母线电压不平衡。实验和理论研究表明,负序压降与电流成正比,电压不平衡度随电流的增加而增大。

为解决这一问题,本研究从理论上提出了三种解决方案:一是并网线路进行均匀换相改造,通过减小同塔线路等

值阻抗矩阵各相参数偏差,有效改善光伏电站母线电压不平衡,使负序电压分量和零序电压分量降低至零;二是调整线路的挂线方式并使光伏电站母线并列运行,将光伏电站母线电压不平衡度有效降低至1.0%;三是在同塔线路送出侧安装串联型柔性输电设备(如SSSC、MPFC)进行不平衡电压补偿,从而有效改善送出侧电压不平衡。

参考文献

- [1] 董尔佳,郭昶,金镇山等.220kV同塔双回输电线路电流不平衡问题研究[J].黑龙江电力,2013,35(1):9-12。
- [2] 朱庆钢,刘前进,陈海涛,等.同塔双回不换位线路电压不平衡度研究[J].电力系统保护与控制,2014(7):73-79。
- [3] 徐敏,吴成,罗燎,等.江西220kV同塔双回不换位线路不平衡度研究[J].科学技术与工程,2017,17(3):231-235。