

光伏扶贫地区220 kV变电站电能质量运行状态研究

徐斌¹, 潘岩², 朱明星², 刘星¹

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽大学教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230601)

摘要: 基于光伏扶贫地区220 kV红石变电站电能质量实测数据, 对该变电站的电能质量运行状态进行研究, 指出该变电站存在的电能质量问题。通过使用阻抗建模与Matlab仿真分析的方法对该变电站所存在的电能质量问题进行分析, 并对电能质量问题传递规律进行研究。以期为该地区配电网的电能质量问题研究提供一定参考, 并在工程技术层面上保障光伏扶贫政策的顺利实施。

关键词: 光伏扶贫; 电能质量; 变电站; 阻抗建模; 仿真; 传递规律

Research on power quality running state of 220 kV substation in photovoltaic poverty alleviation area

XU Bin¹, PAN Yan², ZHU Mingxing², LIU Xing¹

(1. Anhui Electric Power Company Research Institute, Hefei 230601, China; 2. Power Quality Engineering Research Center Ministry of Education Institute, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on the measured data of the 220 kV red stone power quality measured in the photovoltaic area, the power quality operation state of the substation is studied, and the problems of the power quality in the substation are pointed out. Through the method of impedance modeling and Matlab simulation analysis, the power quality problem of the substation is analyzed, and the transmission law of the power quality problem is studied, in order to provide some reference for the study of power quality problems in the distribution network of the area, and ensure the smooth implementation of PV poverty alleviation policy at the engineering level.

Key word: photovoltaic poverty alleviation; power quality; substation; impedance modeling; simulation; transmission law

0 引言

金寨县位于安徽省六安市南部, 地处皖西大别山区, 在2014年被列为光伏扶贫“示范
国家电网公司2016年科技项目(分布式光伏发电电能质量影响及综合治理方案研究)

县”, 该地区为全国产业扶贫提供了可复制、可推广的样板。其中在该地区实施的光伏扶贫工程被列为全国精准扶贫十大工程之一, 不仅响应了国家打赢扶贫攻坚战的号召, 又顺应了新能源发电的潮流, 具有重要的经济意义与政

治意义。

随着新能源发电在该地区的大力推广,光伏发电在该地区呈现大规模、高密度的趋势,从根本上改变了原有配电网的结构,从配电网规划、运行控制和维护管理等多个层面给配电网的安全防护带来了挑战^[1-4],在局域电网的电能质量、电压稳定和调度控制等方面均会带来一定的冲击和影响。为了保证光伏扶贫工程的安全实施,对该地区的典型分布式光伏发电并网系统进行电能质量测试与评估,为光伏发电并网系统的电能质量机理研究、控制理论基础和运行管理提供技术支撑,避免因电能质量问题而引起的光伏发电解列等问题^[5-7],经济价值高、社会意义大。

1 220 kV变电站电能质量测试

本次的测试对象为金寨县境内220 kV红石变电站,该变电站内有两台主变压器,1[#]主变压器容量为180 MV·A,分别给站内110 kV I段母线与35 kV I段母线供电,2[#]主变压器容量为150 MV·A,分别给110 kV II段母线与35 kV II段母线供电,其中110 kV母线短路容量为728 MV·A,35 kV母线短路容量为484.19 MV·A。110 kV母线有100 MW集中光伏接入,35 kV母线有42 MW集中光伏接入。220 kV红石变电站电能质量测试与具体的测点分布如图1所示。

在天气晴朗时,光伏正常并网发电的情况下按照测点分布与测试流程进行测试,测试流程如图2所示,各测点的测试周期为24~72 h。

基于测试数据,对各测点的电能质量运行数据进行统计分析与评估,发现该变电站内存在谐波电流与电压闪变超标的电能质量问题,超标指标的统计结果如表1所示。

由表1可知,红石变电站1[#]主变压器35 kV I段进线和110 kV I段进线23次与25次谐波电流超标,但其他各次谐波电流均在国标限值规定范围内。此外,35 kV I段母线与110 kV I段母

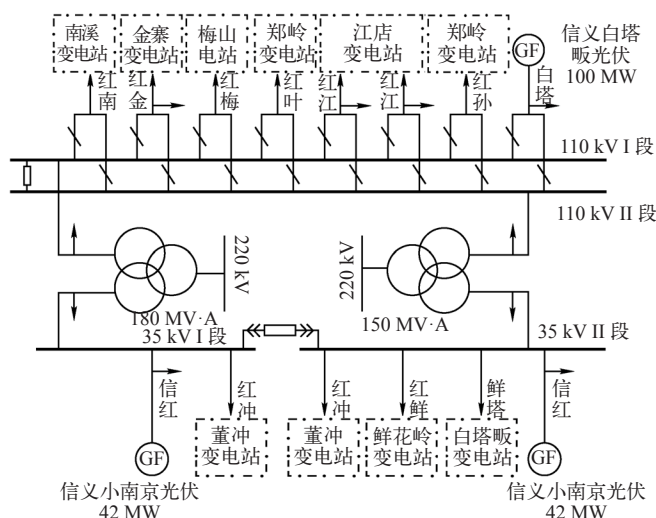


图1 光伏扶贫地区220 kV变电站电能质量测试测点设置图

Fig. 1 Setting point of power quality test for 220 kV substation in photovoltaic poverty alleviation area

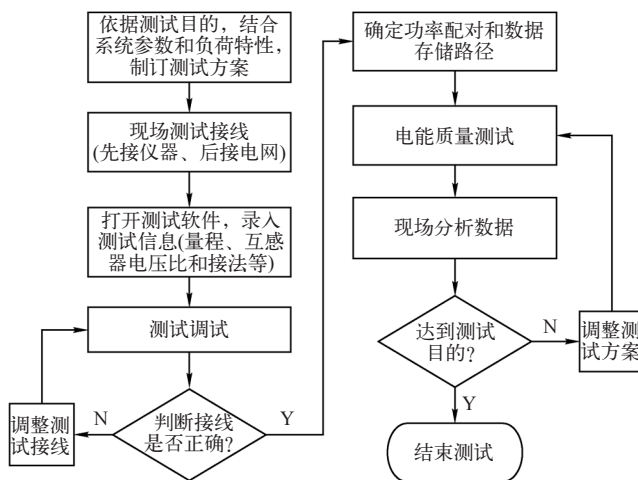


图2 光伏扶贫地区220 kV变电站电能质量测试流程

Fig. 2 Power quality test flow chart of 220 kV substation in photovoltaic poverty alleviation area

表1 光伏扶贫地区220 kV红石变电站电能质量测试评估

Tab. 1 Power quality test and evaluation table of 220 kV

Hongshi substation in photovoltaic poverty alleviation area

电能质量指标	测试点	测量值	限值	评估
23次谐波电流/A	35 kV I段总进线	6.14	5.23	不合格
	110 kV I段总进线	4.13	2.04	不合格
25次谐波电流/A	35 kV I段总进线	5.63	4.84	不合格
	110 kV I段总进线	4.57	1.85	不合格
长时电压闪变	35 kV I段母线	1.22	1.0	不合格
	110 kV I段母线	1.25	1.0	不合格

线长时电压闪变超过国标限值。

2 谐波问题研究

2.1 基于实测数据的谐波潮流分析

本节基于220 kV红石变电站实测数据,对该变电站35 kV进线与110 kV进线超标的23次与25次谐波进行谐波潮流分析。

根据实测数据,在谐波电流含量较大的典型工况下,110 kV I段母线23次谐波电压有效值为610.66 V,相角为 174.96° ,110 kV I段母线总进线23次谐波电流含量为4.82 A,相角为 -79.02° 。计算23次谐波阻抗如下

$$Z_{23} = \frac{U_{23}}{I_{23}} = \frac{610.66 \angle 174.96^\circ}{4.82 \angle -79.02^\circ} \quad (1)$$

$$= 126.69 \angle 253.98^\circ (\Omega)$$

Z_{23} 的阻抗角在笛卡儿坐标系第三象限,说明23次谐波电流的潮流由110 kV负荷流入系统。

以上述计算为例,分别对110 kV I段进线25次谐波电流、35 kV I段进线23次谐波电流和35 kV I段进线25次谐波电流进行谐波潮流分析,结果如表2所示。

表2 光伏扶贫地区220 kV红石变电站谐波潮流分析

Tab. 2 Harmonic flow analysis table of 220 kV Hongshi substation in photovoltaic poverty alleviation area

谐波次数	指标	23	25
110 kV I段进线	U_h/V	$611 \angle -175^\circ$	$967 \angle -146^\circ$
	I_h/A	$5 \angle -79^\circ$	$6 \angle -32.5^\circ$
	Z_h/Ω	$122 \angle -264^\circ$	$161 \angle 264^\circ$
35 kV I段进线	U_h/V	$127 \angle 87^\circ$	$255 \angle 148^\circ$
	I_h/A	$7 \angle 46^\circ$	$8 \angle 87^\circ$
	Z_h/Ω	$18 \angle 41^\circ$	$32 \angle 61^\circ$

由表2谐波潮流分析结果可知,110 kV I段进线25次谐波电流由110 kV负荷流入系统;35 kV I段进线23次谐波电流由系统流入35 kV负荷;35 kV I段进线25次谐波电流也是由系统流入35 kV负荷。

选取110 kV母线谐波畸变最大的1 h进行局部分析,得到35 kV I段母线25次谐波电压含有率趋势与110 kV I段母线25次谐波电压含有率

趋势,如图3和图4所示。

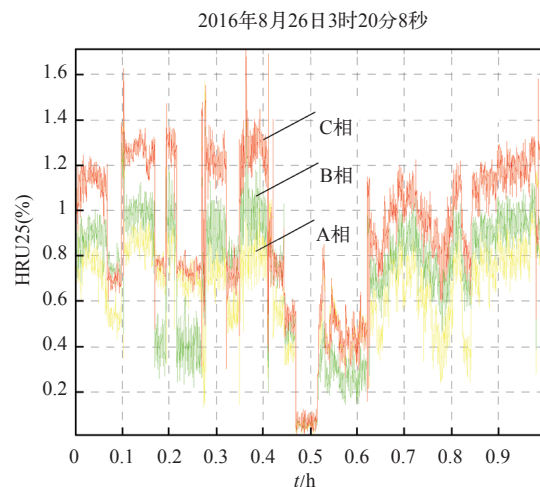


图3 35 kV I段母线25次谐波电压含有率趋势

Fig. 3 The 25 harmonic voltage containing trend of the 35 kV I bus

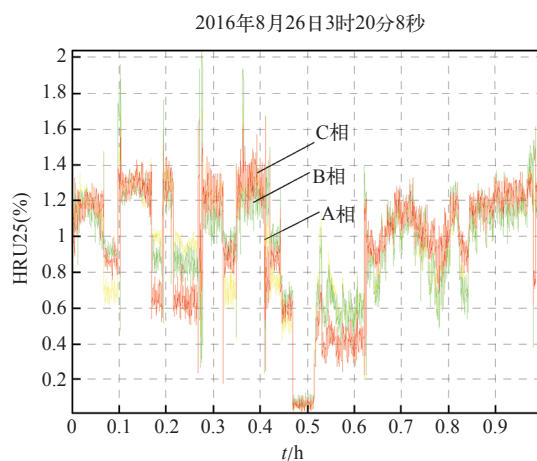


图4 110 kV I段母线25次谐波电压含有率趋势

Fig. 4 The 25 harmonic voltage containing trend of the 110 kV I bus

由图3和图4比较可以发现,35 kV I段进线25次谐波电压含有率趋势与110 kV I段母线25次谐波电压含有率趋势变化基本一致,两段母线的23次谐波电压含有率也呈现出同样的规律。由此可以发现两段母线23次与25次谐波电压含有率趋势呈正相关。

综上所述,35 kV I段母线23次与25次谐波是由110 kV传递而来的,23次和25次谐波电流源位于110 kV负荷中,经过三绕组变压器传递,从而导致35 kV进线23次与25次谐波电流超过国标限值。依据调研可知,红石变电站110 kV

母线下接有钢铁厂负荷, 110 kV进线23次与25次谐波电流可能由钢铁厂负荷的中频电源产生。

2.2 220 kV红石变电站谐波传递规律研究

本节选取上述谐波潮流分析结果作为基础, 对220 kV红石变电站供电系统23次与25次谐波传递规律进行研究。该变电站供配电系统阻抗模型如图5所示, 各阻抗如图5中标注, 所有阻抗均折算至220 kV电压等级。220 kV系统短路容量为3 148.99 MV·A, 变压器容量为180 MV·A, 电压比为220/110/35 kV。110 kV负荷视在功率为39.5 MW, 功率因数为0.94; 35 kV负荷平均视在功率为13.27 MW, 功率因数为0.99。

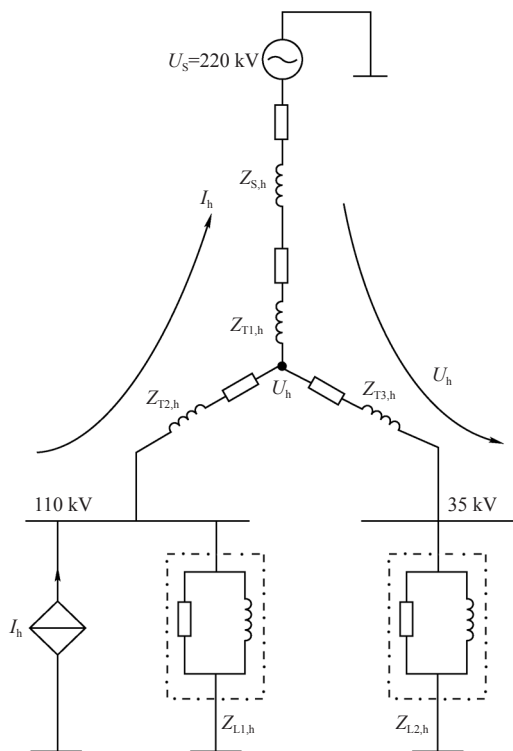


图5 220 kV红石变电站供配电系统阻抗模型图

Fig. 5 Impedance model diagram of power supply and distribution system in 220 kV Hongshi substation

依据图5可知, 三绕组变压器低压绕组串联35 kV负荷阻抗支路和高压绕组串联系统阻抗支路相并联的谐波阻抗为

$$Z_{1,h} = \frac{(Z_{T1,h} + Z_{S,h}) \times (Z_{T3,h} + Z_{L2,h})}{Z_{T1,h} + Z_{S,h} + Z_{T3,h} + Z_{L2,h}} \quad (2)$$

式中, $Z_{S,h}$ 为220 kV系统等效谐波阻抗; $Z_{T1,h}$ 、

$Z_{T3,h}$ 为三绕组变压器高压和低压绕组等效谐波阻抗; $Z_{L2,h}$ 为35 kV母线接入负荷等效谐波阻抗。

所以110 kV进线的谐波电流系数为

$$K_{1h} = \frac{Z_{L1,h}}{Z_{L1,h} + Z_{T2,h} + Z_{1,h}} \quad (3)$$

式中, K_{1h} 为谐波电流系数; $Z_{L1,h}$ 为110 kV负荷等效谐波阻抗; $Z_{T2,h}$ 为三绕组变压器中压绕组等效谐波阻抗。

代入谐波阻抗值计算得出, 110 kV进线23次与25次谐波电流系数分别为0.959和0.957, 说明110 kV负荷产生的23次与25次谐波电流有95.9%和95.7%流入了三绕组变压器。

变压器三绕组等效中性点谐波电流系数为

$$K_{1h,1} = \frac{Z_{L2,h} + Z_{T3,h}}{Z_{L2,h} + Z_{T3,h} + Z_{S,h} + Z_{T1,h}} \quad (4)$$

代入谐波阻抗计算得出, 变压器三绕组等效中性点23次与25次谐波电流系数分别为0.994和0.993。这说明23次与25次谐波电流由110 kV负荷流入三绕组变压器后, 向220 kV电压等级传递, 其中流入三绕组变压器的23次与25次谐波电流分别有99.4%和99.3%经过三绕组变压器传递至220 kV电压等级, 即谐波电流由三绕组变压器的中压侧向高压侧传递。

23次与25次谐波电流流入三绕组变压器高压侧后, 在变压器三绕组等效中性点产生谐波电压 U_h , 以23次与25次谐波电压向35 kV母线传递, 所以35 kV母线谐波电压系数即为 U_h 在35 kV母线上的分压比例。

$$K_{Uh} = \frac{Z_{L2,h}}{Z_{L2,h} + Z_{T3,h}} \quad (5)$$

代入谐波阻抗计算得出, 23次与25次谐波电压系数均为0.998。说明变压器三绕组等效中性点的23次与25次谐波电压有99.8%经过变压器降压后分压在35 kV母线上, 即谐波电压由高压侧向低压侧传递。

综上所述, 23次与25次谐波对于35 kV母线来说为背景谐波。23次与25次谐波电流由110 kV母线所接入的负荷产生, 谐波电流几乎全部流入三绕组变压器高压侧, 并在变压器三

绕组等效中性点产生谐波电压，以阻抗分压的形式向35 kV母线传递，从而导致35 kV进线相应频率的谐波电流超过国标限值。

3 电压闪变问题研究

分析实测数据，选取35 kV和110 kV母线电压闪变最大的2 h进行局部分析，分别得出35 kV母线与110 kV母线电压闪变的实测趋势曲线如图6和图7所示。接着计算出局部分析时间内35 kV和110 kV进线的功率变化量，进而计算出母线的电压变动为^[8]

$$d = \frac{R_L \Delta P + X_L \Delta Q}{U_N^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中， R_L 和 X_L 为电网阻抗的电阻分量与电抗分量； ΔP 和 ΔQ 为三相负荷的有功功率变化量； U_N 为系统的标称电压。

从电压变动信号里提取出电压波动分

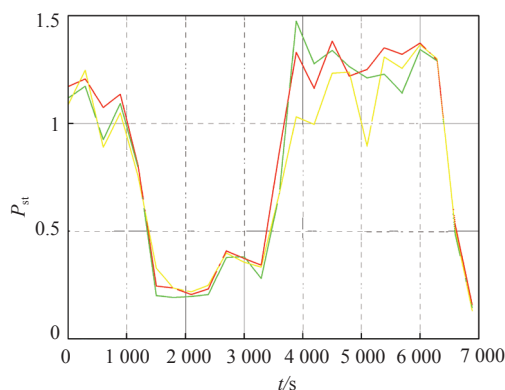


图6 35 kV母线电压闪变实测趋势

Fig. 6 Measured trend of voltage flicker of 35 kV bus

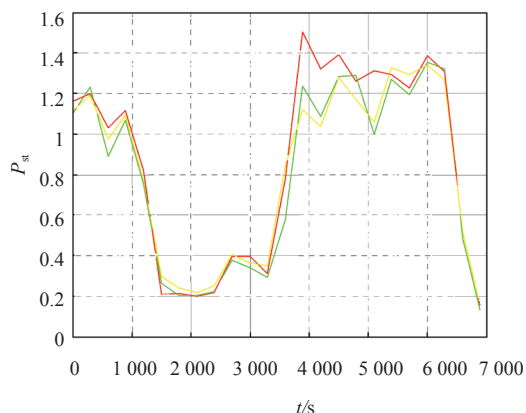


图7 110 kV母线电压闪变实测趋势

Fig. 7 Measured trend of voltage flicker of 110 kV bus

量，利用电压波动分量与闪变视感度系数关系求出闪变，并得出闪变仿真趋势如图8和图9所示。

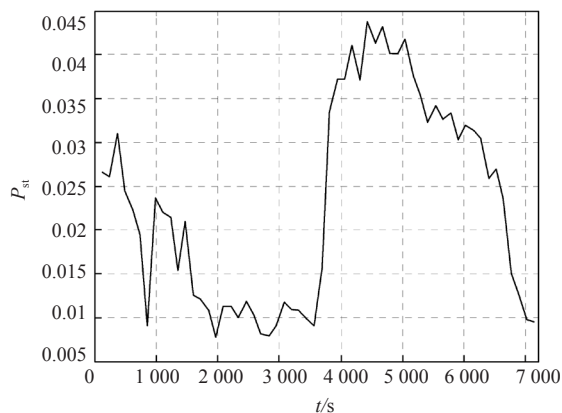


图8 35 kV母线电压闪变仿真趋势图

Fig. 8 Trend diagram of voltage flicker simulation of 35 kV bus

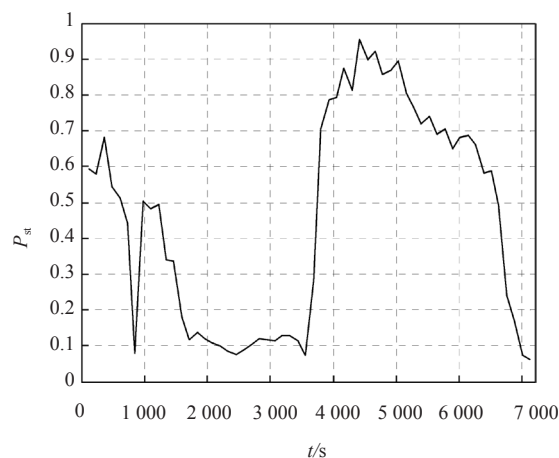


图9 110 kV母线电压闪变仿真趋势图

Fig. 9 Trend diagram of voltage flicker simulation of 110 kV bus

由图6和图8对比可以发现，35 kV进线功率冲击所引起的母线电压闪变远小于实测值，说明35 kV进线的功率变化远不足以引起本级系统实际测量大小的电压闪变，所以35 kV母线闪变主要由背景传递而来。

由图7和图9对比可以发现，110 kV进线功率冲击在本级系统所引起的母线电压闪变较接近于实测值，说明110 kV母线所接入的负荷中存在闪变源。通过对比可以发现仿真与实测还存在一定误差，具体有两个方面原因：①仿真趋势是在110 kV母线最小短路容量条件下仿真得到，和系统实际运行的状态存在一定差别；

②110 kV母线电压闪变测试值是由220 kV母线背景电压闪变传递至110 kV母线引起的电压闪变、35 kV母线电压闪变传递至110 kV母线引起的电压闪变和110 kV进线功率变化引起的110 kV母线电压闪变三者叠加而成，而仿真未考虑220 kV母线背景电压闪变和35 kV母线电压闪变的传递。正是由以上两方面原因造成了仿真与实测的误差，但不影响以上分析的正确性。另外，同样可以发现，110 kV母线电压闪变主要由110 kV进线功率变化所导致，所以220 kV母线背景电压闪变传递至110 kV母线引起的电压闪变相对较小。

依据电压闪变的叠加规律，35 kV母线电压闪变为

$$P_{st,35\text{ kV}} = \sqrt[m]{(P'_{st,35,220\text{ kV}})^m + (P'_{st,35,110\text{ kV}})^m + (P'_{st,35\text{ kV}})^m} \quad (7)$$

式中， $P'_{st,35,220\text{ kV}}$ 为220 kV母线背景电压闪变传递至35 kV母线，在35 kV母线上引起的短时间闪变值； $P'_{st,35,110\text{ kV}}$ 为110 kV母线短时闪变值传递至35 kV母线，在35 kV母线引起的短时间闪变值； $P'_{st,35\text{ kV}}$ 为35 kV进线功率变化引起的短时间闪变值； m 的值取决于主要闪变源的性质及工况的重叠可能性。

通过以上分析可知，式(7)中 $P'_{st,35,220\text{ kV}}$ 和 $P'_{st,35\text{ kV}}$ 的值较小，所以35 kV母线电压闪变主要由 $P'_{st,35,110\text{ kV}}$ 决定，即主要由110 kV母线传递至35 kV母线，在35 kV母线上引起的电压闪变决定。

依据电压闪变传递的规律，电压闪变由110 kV母线向35 kV母线传递满足以下关系^[8]

$$P_{st,35,110\text{ kV}} = \frac{S'_{sc35\text{ kV}}}{S_{sc35\text{ kV}} - S'_{sc110\text{ kV}}} P_{st,110\text{ kV}} \quad (8)$$

式中， $P_{st,110\text{ kV}}$ 为110 kV母线短时闪变值； $S'_{sc35\text{ kV}}$ 为110 kV母线短路时35 kV流向110 kV母线的短路容量， $S_{sc35\text{ kV}}$ 为35 kV母线的短路容量； $S'_{sc110\text{ kV}}$ 为35 kV母线短路时110 kV母线流向35 kV母线的短路容量。

一般认为，当110 kV母线短路时，流向110 kV母线的短路容量由更高一级的电压等级

提供，所以35 kV母线流向110 kV母线的短路容量为0，即 $S'_{sc35\text{ kV}}=0$ ，且 $S'_{sc110\text{ kV}}=S_{sc35\text{ kV}}$ ，所以 $P'_{st,35,110\text{ kV}}=P_{st,110\text{ kV}}$ 。由35 kV母线和110 kV母线电压闪变实测趋势对比可以发现，35 kV短时电压闪变与110 kV母线短时电压闪变趋势和值基本一致，符合电压闪变传递规律。

综上所述，导致110 kV母线与35 kV母线电压闪变超标的闪变源位于110 kV负荷中，电压闪变传递至35 kV母线，导致35 kV母线电压闪变超标。

4 结束语

本文基于光伏扶贫地区220 kV红石变电站实测数据与仿真结果，对220 kV变电站谐波与闪变超标问题进行分析，主要得出以下结论：

1) 23次与25次谐波源位于110 kV母线负荷中，由110 kV负荷产生23次与25次谐波电流流入变压器，在变压器三绕组等效中性点产生谐波电压，通过阻抗分压向35 kV母线传递，使35 kV进线23次与25次谐波电流超标。

2) 引起35 kV母线与110 kV母线电压闪变超标的闪变源位于110 kV负荷中，电压闪变传递至35 kV母线，导致35 kV母线电压闪变超标。

针对测试所暴露出的电能质量问题，应予以充分重视。红石变电站35 kV母线下接有大型光伏电站以及分布式光伏电站若干，光伏逆变器的入口滤波器的固有谐振频率可能与背景谐波的频率一致，从而放大背景谐波电压，导致光伏逆变器过电压保护动作，造成并网光伏解列。可进一步对谐波源进行定位，并投入滤波器对谐波电流进行滤除。而电压闪变超标主要由110 kV进线功率波动导致，中高压系统电压闪变的原因主要以无功波动为主，可以在110 kV母线接入的大型波动型负荷母线上投入动态无功补偿装置，以抑制无功波动，进而抑制电压闪变。

参考文献

[1] 张璐,唐巍,丛鹏伟,等.含光伏发电的配电网

- 有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014 (31): 5525-5533.
- [2] 谢宁, 罗安, 陈燕东, 等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013 (36): 10-17.
- [3] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013 (34): 9-16.
- [4] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013(2): 26-32, 39.
- [5] 孙孝峰, 王伟强, 沈虹, 等. 基于双阻性有源滤波器的背景谐波抑制策略[J]. 电工技术学报, 2016 (16): 145-153.
- [6] 程军照, 王文玺, 黄梅, 等. 谐波对配电变压器热寿命的影响研究[J]. 云南电力技术, 2016(3): 87-91, 95.
- [7] 陈静, 符玲, 臧天磊, 等. 考虑背景谐波波动的谐波责任划分方法[J]. 电力自动化设备, 2016(5): 61-66.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

作者简介



徐斌

徐斌(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 电网电能质量分析与控制研究。

潘岩(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事电能质量分析与控制研究。

(收稿日期: 2018-05-07) **EA**