

# 毕节新能源送出电网故障分析及 送电能力提高措施分析

明杰<sup>1</sup>, 王国松<sup>2</sup>, 梅涛<sup>1</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;  
2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 55000)

**摘要:** 电网稳控系统作为整个电力系统的重要保护手段, 可以避免电网故障进而引发大范围停电的情况发生, 是保证电网安全稳定运行的重要防线。首先, 分析了毕节新能源建设工程情况; 其次, 根据该区域电网2023年网架情况, 对该区域内电网交流系统进行了详细的稳定计算, 分析系统存在的稳定问题和薄弱环节; 最后, 针对不同的交流线路故障, 提出提高毕节新能源送出的措施建议, 为该区域大电网安全运行提供保障。

**关键词:** 电网稳控系统; 稳定计算; 变电站; 稳控策略

中图分类号: TM 732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)04-0081-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230415

## Fault Analysis of Bijie New Energy Transmission Grid and Measures for Improving Transmission Capacity

MING Jie<sup>1</sup>, WANG Guosong<sup>2</sup>, MEI Tao<sup>1</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. Power Dispatching Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China)

**Abstract:** The power grid stability control system, as an important protection measure for the entire power system, can avoid power grid failures resulting in large-scale power outages, and is an important defense line to ensure the safe and stable operation of power grid. Firstly, the situation of new energy construction project in Bijie is analyzed. Secondly, based on the grid structure of its regional power grid in 2023, a detailed stability calculation is carried out for AC system of power grid in this region, and the stability problems and weak links of the system are analyzed. Finally, measures and suggestions are proposed to improve the transmission ability of new energy in Bijie for different AC line faults, which provides guarantees for the safe operation of regional power grid.

**Key words:** power grid stability control system; stability calculation; substation; stability control strategy

## 0 引言

随着大规模电网互联、远距离输电的不断发展、分布式发电的大量运用以及电力电子等设备越来越多, 电网的内部结构和运行特点变得复杂, 电网安全稳定问题日益突出, 同时电网局部产生的故障也可能导致大电网的崩溃, 造成不可估量的损失<sup>[1-4]</sup>。因此, 及时发现故障、分析故障原因并采取相应稳定

控制措施, 可以保证大区域电网的供电可靠性, 防止电网故障后果的进一步加重。

稳控系统作为电力系统的重要防线, 保护着系统各设备在正常范围内工作。在电网发生故障失稳后, 稳控系统通过切发电机组、切负荷来减少出力和负荷, 调整功率(上升或下降), 以此来实现故障区域或更大范围电网的安全稳定控制<sup>[5]</sup>。稳控系统有助于维持功角、电压稳定以及电网的可持续稳定供电<sup>[6-10]</sup>。

下面分析毕节新能源送出电网安全问题。针对该区域电网网架不断变化以及发电、负荷逐步增加的情况,研究毕节区域电网出现的交流故障以及故障发生后稳定控制系统采取的措施,对有效抑制故障的进一步扩大、保障电网安全运行具有重要意义。

## 1 毕节新能源概况

毕节新能源以光伏发电为主,集中在乌撒区域。光伏发电集中汇集到 220 kV 光伏汇集站 1 和 220 kV 光伏汇集站 2。当地的水电汇集到 220 kV 水电汇集站。220 kV 光伏汇集站 1 和 220 kV 水电汇集站分别经 220 kV 联络线接入 500 kV 汇集站,再经 1 回 500 kV 联络线路长距离接入主网的 500 kV 变电站 3 实现与主网连接。毕节新能源送出电网如图 1 所示。

光伏群总装机容量为 460 MW,各光伏站装机容量见图 1。

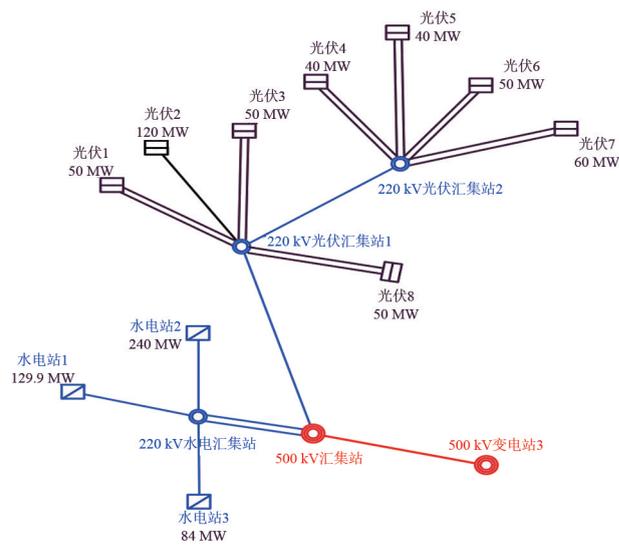


图 1 毕节新能源送出电网

## 2 研究方法及原则

### 2.1 计算原则

#### 2.1.1 计算模型及稳定判据

- 1) 发电机模型:采用“ $E_q$ ”和“ $E_d$ ”电势变化的计算模型。
- 2) 负荷模型:采用 50% 感应电动机+50% 恒阻抗的综合负荷模型,并计入频率因子。
- 3) 直流模型:采用能模拟直流电压和电流测量环节、电流调节器、VDCOL 限制环节以及触发控制

环节的直流控制系统模型。

根据《电力系统安全稳定导则》和《南方电网安全稳定计算分析导则》,系统稳定应同时满足:

1) 暂态稳定。遭受扰动后,同步系统内各机组之间功角相对摇摆,经过第一、第二振荡周期不失步,作同步衰减振荡,系统中枢点电压逐渐恢复。

2) 动态稳定。电网在遭受大小干扰后,仍能通过自控设备维持自身长时间稳定运行,一般指在干扰后,不出现发散性或持续性的振荡。

3) 电压稳定。电网电压受到干扰后在一定条件下仍能维持或恢复到安全范围内,不出现电压崩溃的现象,电压稳定包括电压静态和暂态稳定。

4) 频率稳定。电网遭受剧烈干扰后,在电源与负载的巨大不平衡条件下,电网频率仍可维持在可接受范围内而不出现频率崩溃。

5) 热稳定。电网中的电力装置能经受住短路电流所引起的热效应,而不会造成装置的损害。

#### 2.1.2 故障类型与计算时序

电网故障主要包括单相瞬时性故障、线路三相永久性故障、主变压器故障、平行线路单回三相永久性跳双回及电厂送出线路  $N-1.5$  故障以及稳控远方切机、切负荷时间故障等。计算时序如表 1 所示。

表 1 计算时序

故障类型	计算时序
单相瞬时性故障	故障后两侧 0.1 s 故障相跳开,故障后 1.1 s 故障相重合闸成功
线路三相永久性故障	故障后两侧 0.1 s 跳开
线路单回故障跳双回故障	故障后两回线路两侧 0.1 s 跳开
主变压器故障	故障后 0.1 s 主变压器各侧跳开
双回线路 $N-1.5$ 故障	一回线路三相永久性故障后 0.1 s 线路两侧跳开;另外一回线单相瞬时性故障,故障后 0.1 s 故障相两侧断开
稳控远方切机、切负荷时间	交流故障后 0.3 s

### 2.2 计算方式

“ $N-1$ ”原则,又称为单一故障安全检验法则,是一种基于电网稳定运行的技术需求,具体指电网中任一电力器件在正常运行下或由于故障被切断,电网能维持稳定的工作状态且其他部件不负载运行,电压、频率都保持在安全范围内。所选取的基础计算方式突破“ $N-1$ ”原则,即在夏季考虑毕节区域水电、火电、新能源等电力均尽量满发,只要正常运行时无元件过载即可, $N-1$  故障后出现的稳定问题则依靠安全稳定控制措施解决。

同样以“保证正常运行时无元件过载,  $N-1$  故障后出现的稳定问题依靠安全稳定控制措施解决”为原则,在 2023 年夏小多发方式下做 500 kV 及 220 kV 线路检修,具体检修方式主要包括 500 kV 汇集站升压变压器检修、500 kV 变电站 3 主变压器检修、500 kV 双回线一回线路检修、220 kV 双回线一回线路检修等。

### 3 交流系统故障及提高送电能力措施分析

以在 2023 年夏小多发方式下,500 kV 线路单相瞬时性故障为例,测算 500 kV 联络线和 220 kV 水电联络线两侧的相角差、测定电压及余弦电压,如图 2、图 3 所示。

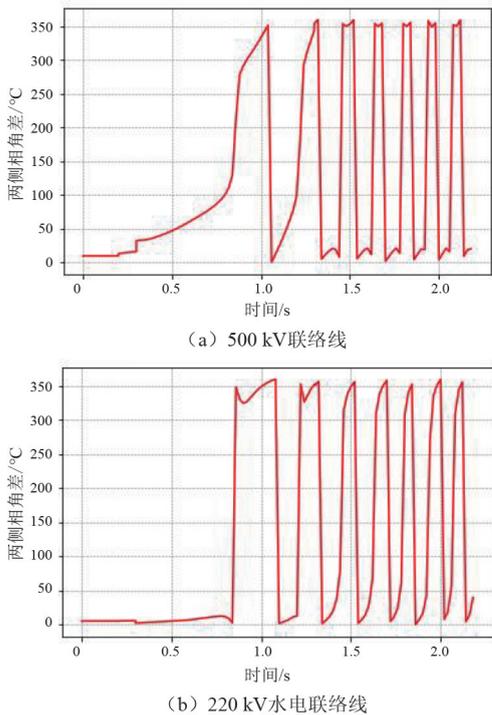


图 2 联络线两侧相角差

根据图 2 和图 3 中两侧相角差及测定电压可判断,电网内交流线路故障后出现功角失稳问题及振荡中心落在 500 kV 联络线或者 220 kV 水电联络线上。

光伏和水电打捆后送出能力受不同能源出力比例的影响,为避免功角失稳问题,列举两种方式的不同能源出力比例进行仿真,计算结果如表 2 所示。

方式 1:减小光伏出力 80 MW 以使 500 kV 联络线潮流为 820 MW,500 kV 联络线单相瞬时故障无暂稳问题。

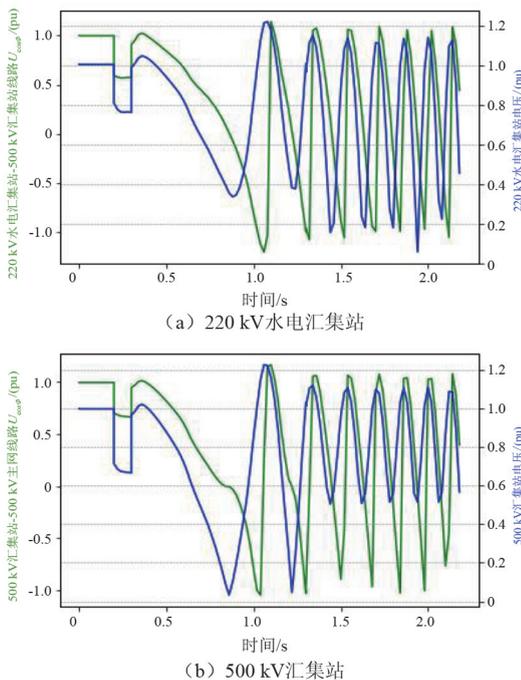


图 3 测定电压及余弦电压  $U_{\cos\phi}$

表 2 500 kV 汇集站至 500 kV 变电站 3 线路预控方式

方式	500 kV 联络线潮流/MW	水电出力/MW	光伏出力/MW
方式 1	820	454	380
方式 2	779	332	460

注:表中未示出网损。

方式 2:减小水电出力 120 MW 以使 500 kV 联络线潮流为 779 MW,预控,500 kV 联络线单相瞬时故障无暂稳问题。

为提高 500 kV 联络线送电能力,通过提高光伏电站电压稳定能力来实现,考虑采用静止无功发生器(static var generator,SVG)增容、加装调相机以及新建串联补偿装置等方式。

#### 1) SVG 增容

表 3 为以 220 kV 光伏汇集站 1、220 kV 光伏汇集站 2 作为节点,新增不同容量的 SVG 后的送电能力分析。

表 3 SVG 增容提高送电能力分析

序号	新增 SVG 容量/Mvar	撒奢线有功功率/MW	负载率/%
1	110	879.6	43.12
2	220	908.4	44.53
3	330	927.4	45.46
4	440	936.9	45.93
5	550	946.2	46.38

SVG 容量从 110 Mvar 至 550 Mvar,对应的有功功率也随之增加。通过安装和调节这些 SVG 设备,可以有效控制系统的无功功率流动,提高电力系统

的稳定性和可靠性。

2) 新建串联补偿装置,补偿度为 30%,乌撒电源可满出力。

3) 新建调相机 100 Mvar,毕节新能源可满出力。

## 4 结 论

上面对毕节新能源 500 kV 送出系统进行了电网稳定研究,分析了毕节新能源和水电送出 500 kV 联络线存在的稳定问题,提出了提高送电能力的措施。

### 参考文献

- [1] 李明节.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J].电网技术,2016,40(4):985-991.
- [2] 杨欢欢,付超,李诗旸,等.南方电网稳定控制系统高保真传动试验方案设计与结果分析[J].南方电网技术,2022,16(5):1-8.
- [3] 许涛,励刚,于钊,等.多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J].电力系统自动化,2017,41(8):98-104.
- [4] 朱锐,黎劲松,杨宝起,等.高比例新能源接入区域电网稳定控制技术探讨[J].电工技术,2021(12):46-49.

(上接第 68 页)

- [13] 秦川,姜燕.基于经济等效时间考虑电压暂降的供电可靠性评估方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(1):144-150.
- [14] 林志超,罗步升,宋志坚.一种基于过程免疫时间的电压暂降后果分级指标[J].云南电力技术,2020,48(6):20-24.
- [15] 肖先勇,秦铄,汪颖,等.考虑敏感设备中断概率的电网线路改造优质供电运营模式研究[J].电网技术,2023,47(2):584-594.
- [16] 汪颖,李成鑫,李国栋,等.基于响应事件工艺参数免疫时间的设备电压暂降敏感特征识别[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):181-187.
- [17] 刘旭娜,张文涛,魏俊,等.基于配电网过电流保护的电压暂降缓解方法[J].电气应用,2017,36(22):69-74.
- [18] HUANG Anjunguo, XIAO Xianyong, WANG Ying. Evaluation scheme of voltage sag immunity in sensitive industrial process[J]. IEEE Access, 2021, 9:66398-66407.
- [19] 罗珊珊,陈兵,汪颖,等.基于过程免疫力和优化 K 近邻估计的配网电压暂降频次估计[J].电工电能新技术,2022,41(7):25-37.
- [20] 徐琳,刘畅,杨华.敏感工业过程电压暂降免疫时间评估[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(2):110-116.
- [21] 钟庆,何淇彰,陈伟坤,等.基于甘特图的过程免疫时间计算方法[J].电力系统自动化,2019,43(7):174-181.

- [5] 肖友强,李玲芳,陈义宣.云南电网稳控系统的优化配置研究[J].云南电力技术,2017,45(1):118-119.
- [6] 郝雨辰,江叶峰,仇晨光,等.基于多代理系统的直流微电网分区式稳定控制方法研究[J].电力工程技术,2017,36(5):15-20.
- [7] 郭剑,朱炳铨,徐泰山,等.基于历史数据聚类分析的暂态功角稳定故障筛选[J].电力工程技术,2020,39(2):75-80.
- [8] SHU Y B, TANG Y. Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4):334-339.
- [9] YU W J, XUE Y S, LUO J B, et al. An UHV grid security and stability defense system: considering the risk of power system communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1):491-500.
- [10] 郭琦,朱益华,常东旭,等.电网安全稳定控制系统远程试验方法及工程应用[J].电力系统自动化,2020,44(1):152-159.

### 作者简介:

明杰(1992),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2023-01-19)

- [22] 肖先勇,谭秀美,汪颖,等.基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):105-110.
- [23] 李天楚,伍智鹏,方铭,等.基于 Larsen 推理的电压暂降下工业过程负荷损失率评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(4):145-153.
- [24] 胡兵,徐友才,朱瑞.现代科学与工程计算基础[M].成都:四川大学出版社,2018.
- [25] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality:IEEE Std 1159:2009[S/OL].[2022-10-05].  
<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8796484>.

### 作者简介:

马骏(1984),男,工程师,从事电气管理工作;  
景源(1981),男,助理工程师,从事电气技术管理工作;  
易见(1983),男,高级工程师,从事天然气离心式压缩机组管理工作;

周之松(1988),男,高级工程师,从事水电、压缩机管理工作;

徐方维(1978),女,博士,教授,研究方向为电能质量与电磁兼容;

龙晨瑞(1998),男,硕士研究生,研究方向为电压暂降治理技术。

(收稿日期:2022-12-05)

# 一起 10 kV 谐振接地系统连续故障分析

卫佳奇,袁明哲,陈翔,令狐静波,曹柯,许立志

(国网四川电力公司成都供电公司,四川成都 610041)

**摘要:**单相接地故障在电网中发生故障率较高,研究单相接地故障对提升供电可靠性有重要意义。文中从母线电压的角度剖析了 10 kV 谐振接地系统发生单相接地故障的特点,洞悉单相接地故障的诸多原因,进而减小单相接地故障的发生率,保证电网安全稳定运行。首先,分析系统单相接地故障接地时的暂态过程,得出了暂态电流的具体数学模型;然后,对该起故障的录波波形进行分阶段定性分析,同时使用 Matlab 仿真验证分析的正确性,并探究了在不同接地电阻下母线电压的变化规律;最后,针对谐振接地系统提出建议以减小单相故障的影响范围,具有较高的工程应用价值。

**关键词:**单相接地故障;谐振接地系统;间歇性接地;Matlab 仿真

**中图分类号:**TM 862 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)04-0085-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.202304016

## Continuous Fault Analysis of A 10 kV Resonant Earthed System

WEI Jiaqi, YUAN Mingzhe, CHEN Xiang, LINGHU Jingbo, CAO Ke, XU Lizhi

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Single-phase grounding fault has a high rate occurred in power grid, so its research is of great significance to improve the reliability of power supply. The characteristics of single-phase grounding faults in 10 kV resonant earthed systems are analyzed from the perspective of bus voltage, and several causes of single-phase grounding faults are known clearly, thereby reducing the incidence of single-phase grounding faults and ensuring the safe and stable operation of power grid. Firstly, the transient process of single-phase grounding fault is briefly analyzed, and the specific mathematical form of transient current is obtained. Then a qualitative analysis of the recorded waveform of fault in stages is carried out, Matlab simulation is used to verify the correctness of the analysis, and the variation rule of bus voltage under different grounding resistance is explored. Finally, several suggestions are proposed for the resonant earthed system to reduce the impact of single-phase faults.

**Key words:** single-phase grounding fault; resonant earthed system; intermittent grounding; Matlab simulation

## 0 引言

10 kV 配电网具有网架结构复杂、覆盖面广且运行环境多变等特点,作为电力系统与用户直接相连的重要环节,其安全稳定运行对提升供电企业经济效益和社会效益具有深远意义。电缆线路在城市配电网中已得到广泛应用,其发生单相接地故障的比例达 70%,分析单相接地故障在配电网研究中具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。为满足电力系统不同供电需求,研究人员研究出了 3 种中性点接地方式<sup>[6]</sup>,同时对

不同接地方式下发生单相故障进行了详细的研究<sup>[7-13]</sup>。

由于谐振接地系统的供电可靠性较高,故其在中国配电网中得到了广泛应用。发生单相接地故障时谐振接地系统虽可短时带故障运行,但快速精准定位故障并切除故障可避免故障影响范围扩大,保障设备及电网安全。目前已有较多文献分析单相接地故障并用于故障选线和定位。文献[14]提出了一种暂态选线和高精度稳态选线相结合的综合选线方案,克服了暂态信号不稳定、稳态信号不明显的缺陷,选线准确率高。文献[15]提出了判别金属性接

地和间歇性接地故障的新方法,一定程度上解决了能量法数值偏小、灵敏度不高的问题。文献[16]从理论上分析了谐振接地系统发生单相接地故障时的零序电压、零序电流变化规律,并提出谐振接地系统和中性点不接地系统单相接地时暂态特性相同。文献[17]对故障线路的零序电流波形和补偿方式进行分析,为研究小电流接地系统发生单相接地故障时选线和定位提供了参考。

下面首先对单相稳定接地和单相间歇性接地故障进行介绍;再对一起 10 kV 谐振接地系统连续故障的发展过程及实例波形进行分析,并通过 Matlab 仿真分析验证对实测波形分析的正确性;最后,提出了 10 kV 谐振接地系统的整改措施以减小单相接地故障的影响范围。

## 1 谐振接地系统单相接地故障

谐振接地系统指中性点经消弧线圈接地的系统。接地故障是电力系统中最常发生的故障,可分为稳定接地和间歇性接地。稳定接地故障主要可分为完全接地与不完全接地,其中:完全接地故障表现为接地电阻近似为 0,故障相电压为 0,非故障相电压升高为线电压值,也称为金属性接地故障;不完全接地故障常表现为电弧接地或高阻接地,接地电阻较大且接地点电压与接地电阻的大小有关,也称为非金属接地故障。在间歇性接地故障中,接地点电弧会出现间歇性重燃与熄灭现象,使电网运行方式瞬时多次改变,电磁能振荡加强。下面重点介绍对单相稳定接地和单相间歇性接地进行。

### 1.1 单相稳定接地故障

单相稳定金属性接地故障时,非故障线路的零序电流为

$$(3I_0)_i = j3\omega C_i \dot{U}_0 \quad (1)$$

式中:\$(3I\_0)\_i\$ 和 \$\dot{U}\_0\$ 分别为非故障线路的零序电流和零序电压; \$C\_i\$ 为非故障线路对地电容。由此可看出,非故障线路零序电流由本线路对地电容产生,零序电流固定超前零序电压约 \$90^\circ\$。

单相接地故障使母线电压中性点向故障相方向发生偏移,非故障相母线相电压升高至线电压值。

单相稳定金属性接地故障时,故障线路零序电

$$(3I_0)_m = -\gamma I_c + j3\omega C_m \dot{U}_0 - \frac{\dot{U}_0}{R} \quad (2)$$

$$\gamma = 1 - \frac{1}{3\omega^2 LC_\Sigma} \quad (3)$$

式中:\$(3I\_0)\_m\$ 为故障线路零序电流;\$\gamma\$ 为补偿电网的脱谐度,与消弧线圈有关,消弧线圈过补偿方式下工作时,\$\gamma < 0\$;\$I\_c\$ 为全网电容电流;\$C\_m\$ 为故障线路电容。通过分析可得出以下结论:1)单相接地故障时,流经消弧线圈的电流仅在故障线路故障相中流通,其两端电压为零序电压;2)零序电流在故障线路及非故障线路中均流通;3)故障线路中零序电流与零序电压的相位关系受消弧线圈的影响<sup>[18-20]</sup>。

单相不完全接地故障时,故障相电流为

$$\dot{I}_{km} = \frac{3 \dot{U}_{km[0]}}{3R_g + 2Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}} \quad (4)$$

故障相电压为

$$\dot{U}_{km} = \dot{I}_{km} R_g \quad (5)$$

式中:\$R\_g\$ 为过渡电阻;\$Z\_{\Sigma 1}\$ 和 \$Z\_{\Sigma 0}\$ 分别为正序阻抗和零序阻抗。高阻接地时,故障相电压不为 0,母线电压中性点不再向故障相方向偏移,非故障相电压大小也不再相等。

### 1.2 单相间歇性接地故障

间歇性接地故障是指在绝缘较弱的部位产生接地电弧的多次反复燃熄现象,具有短时多变、接地电流大的特点。故障若长时间发生将导致绝缘水平进一步降低,间歇性电弧将发展成稳定性电弧,最终发展为永久性接地故障。间歇性接地故障存在暂态过程,电流和电压也具有相应暂态特征。

对单相接地瞬间电容电流 \$i\_c\$ 进行暂态分析。

$$i_c = i_{c,os} + i_{c,st} = I_{cm} [ (\omega_f/\omega \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) ] \quad (6)$$

式中:\$i\_{c,os}\$ 和 \$i\_{c,st}\$ 分别为瞬时电容电流的瞬时自由振荡分量和稳态工频分量;\$I\_{cm}\$ 为电容电流的幅值;\$\omega\_f\$ 为瞬时自由振荡分量的角频率;\$\delta\$ 为自由振荡分量的衰减系数,其值为回路时间常数的倒数。由式(6)可知,瞬时电容电流的自由振荡分量与相角 \$\varphi\$ 有关,当 \$\varphi = \pi/2\$ 时,自由振荡分量最大;当 \$\varphi = 0\$ 时,其值最小。

同理可得瞬时电感电流 \$i\_L\$ 的表达式为

$$i_L = I_{Lm} [ \cos \varphi e^{1/\tau_L} - \cos(\omega t + \varphi) ] \quad (7)$$

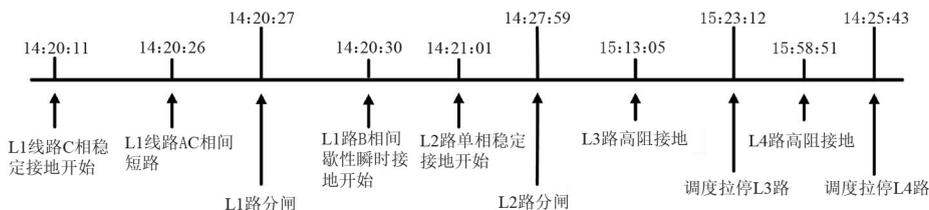


图1 故障时序

式中:  $I_{Lm} = U_{\varphi m} / \omega L$ ;  $\tau_L$  其为电感电路的时间常数。电感电流的幅值同样也与接地瞬间电源电压的相角  $\varphi$  有关,当  $\varphi = \pi/2$  时,其值最小;当  $\varphi = 0$  时,其值最大。

瞬时接地电流即为瞬时电容电流和瞬时电感电流之和,表达式为

$$i_d = i_C + i_L = (I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{cm} (\omega_i / \omega \sin \varphi \cdot \sin \omega t - \cos \varphi \cdot \cos \omega_i t) e^{-t/\tau_C} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-t/\tau_L} \quad (8)$$

式中,瞬时接地电流由稳态分量与瞬时分量构成。其中第一项为稳态分量,即稳态电容电流与稳态电感电流幅值之差;瞬时分量为第二项电容电流的瞬时自由振荡分量与第三项电感电流的瞬时直流分量之和。

## 2 10 kV 谐振连续故障实例分析

### 2.1 故障前运行方式

该 110 kV 变电站主接线方式为内桥接线,有两台主变压器,均为三圈变压器 110 kV/10.5 kV/6 kV,容量为 40 MVA,故障前通过 110 kV 线路带两台主变压器供全站负荷;110 kV 并列运行,10 kV I、II 母处于分列运行状态,10 kV I 母有 5 条出线,均为电缆线路,CT 变比为 600/5。

### 2.2 故障发展过程分析

某日 14:20:00,10 kV L1 出线因地铁施工电缆受外力破坏,发生 C 相单相金属性接地故障,致使该 110 kV 变电站 10 kV I 段母线 A、B 相电压升高;14:20:26 进一步发展为 L1 出线 A、C 相短路故障,过流二段保护动作,二次动作值为 97 A。在系统过电压作用下,14:20:30,10 kV L2 线路的某一联络电缆中间接头 B 相绝缘薄弱点被击穿发生单相接地,一直持续至 14:27:59,调度拉停 L2 线路查找接地,接地信号消失,系统电压恢复正常。同样由于过电压作用,15:13:05,10 kV L3 线路发生高阻性单相接地;15:38:12 调度拉停 L3 线路,接地信号消

失。10 kV L4 线路某变压器电缆进线三叉处因长期受潮,有轻微的放电,绝缘逐渐在下降。因变电站 10 kV I 段母线出线间隔多次发生接地,在系统过电压的冲击下绝缘被击穿放电,16:13:51 发生单相非金属性接地故障;16:40:43 调度拉停 L4 路,接地信号消失。本次故障时序如图 1 所示。

### 2.3 实例故障波形分析

本次故障主要是由不同线路的单相接地导致的,图 2 至图 4 为故障录波的 10 kV I 母线电压波形(二次值)。根据波形特点可以初步判断图 2 发生了 C 相金属性稳定接地故障,由于消弧线圈对电容电流的补偿作用使得接地点处电流很小,母线故障相电压处于很低水平;图 3 发生了 B 相间歇性接地故障,接地电阻很小,属于金属性接地,由于系统的阻尼特性,使得 A、C 两相在电压恢复的过程中呈现不同的特性;图 4 发生了 A 相非金属性稳定接地故障,母线故障相电压并未下降太多,但有零序电压存在。

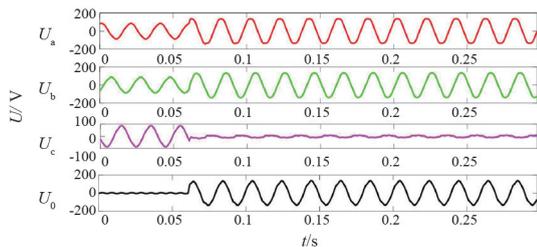


图2 实测 C 相稳定接地故障母线波形

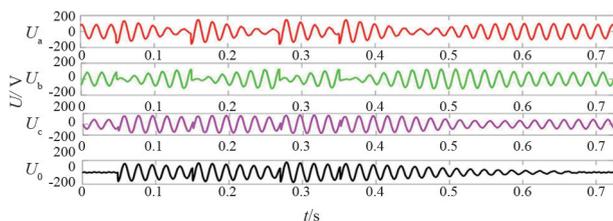


图3 实测 B 相间歇性接地故障母线波形

## 3 单相接地故障 Matlab 仿真分析

为对上述结论进行验证,对 10 kV 谐振接地系

统进行仿真,模拟该系统在发生单相稳定接地故障(金属性接地)、单相间歇性接地(金属性接地)和单相非金属性接地故障时,系统母线电压的变化情况。仿真系统结构如图 5 所示。仿真模型中母线所带的 5 条出线均为电缆线路,长度依次为 12 km、5 km、15 km、10 km、7 km。使用三相故障模块设置故障类型以及故障发生的时间,假设故障均发生于 L1 线路距母线 10 km 处。消弧装置的电感值可以通过计算得出,约为 0.15 H。使用该值进行单相接地故障仿真,得出故障处电流小于 5 A,说明电感值选取较为合适。在电网实际运行中,录波器并未采集支路的电压电流,因此以母线电压波形为研究对象。

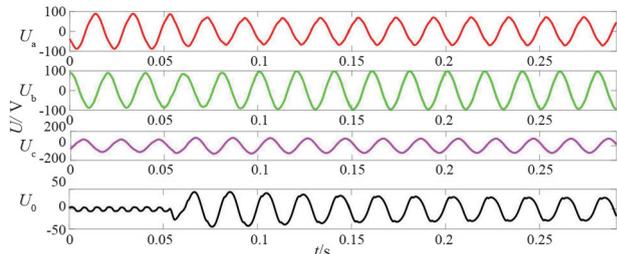


图 4 实测高阻接地母线波形

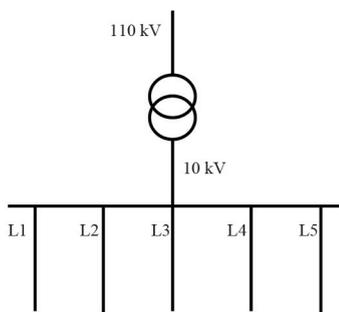


图 5 仿真系统结构

### 3.1 单相稳定接地故障仿真

通过三相故障模块设置单相稳定接地故障发生于 0.08 s,仿真总时长为 0.5 s,结果如图 6 所示,仿真效果与理论分析一致。当 L1 线路发生 B 相稳定接地故障时,母线 B 相电压瞬时降低,同时非故障

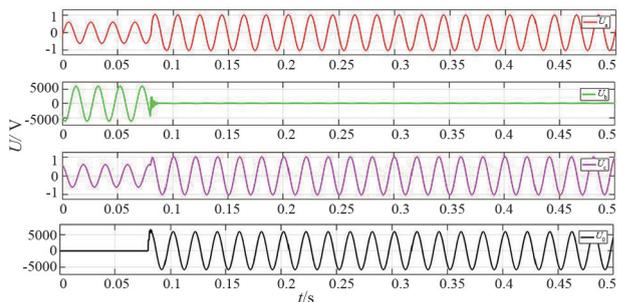


图 6 单相稳定接地故障母线波形

相电压幅值增大为线电压值,零序电压幅值为相电压值。此时线电压依然保持对称,因此谐振接地系统可短时带故障运行,有助于提高供电可靠性。

### 3.2 单相间歇性接地故障仿真

在三相故障模块中设置故障发生的时间以及故障持续时间,实现间歇性单相接地故障模拟。共设置了 3 次故障发生于 0.05 s、0.21 s、0.53 s,故障持续时间均为 2 ms,母线电压波形如图 7 所示。

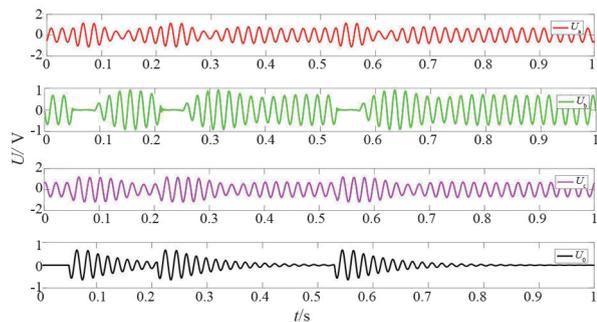


图 7 B 相间歇性接地故障母线电压波形

可以看出,当谐振接地系统发生间歇性接地故障时,故障相电压也被迅速拉低,待电弧熄灭(接地故障消失)后,故障相电压开始恢复,由于系统参数原因,电压恢复过程中存在超调的现象;同时零序电压开始衰减,其衰减的快慢与消弧装置电阻相关。图 8 为第二次间歇性接地故障时故障点处 B 相对地电流和零序电流的波形。

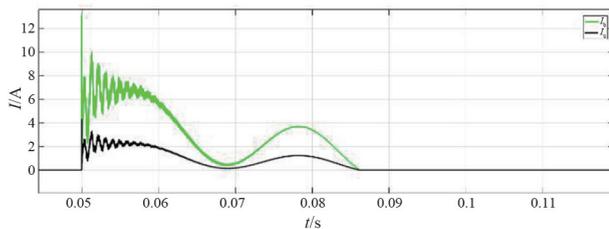


图 8 故障处 B 相对地电流波形

由图 8 可知,当发生接地故障时,故障相流过较大的高频对地电流,故障消失后对地电流也逐渐减小。瞬时分量的幅值随相角变化而改变,电容分量和电感分量可能相互叠加,给瞬时接地电流带来显著增幅。瞬时接地电流首半波的极性与零序电压首半波的极性之间存在 90°的固定关系,可利用此关系作为故障选线判据。

### 3.3 单相非金属性稳定接地故障仿真

通过三相故障模块在 0.3 s 时进行 3 次接地电阻分别为 100 Ω、400 Ω、800 Ω 的永久接地故障仿真,结果如图 9 所示。

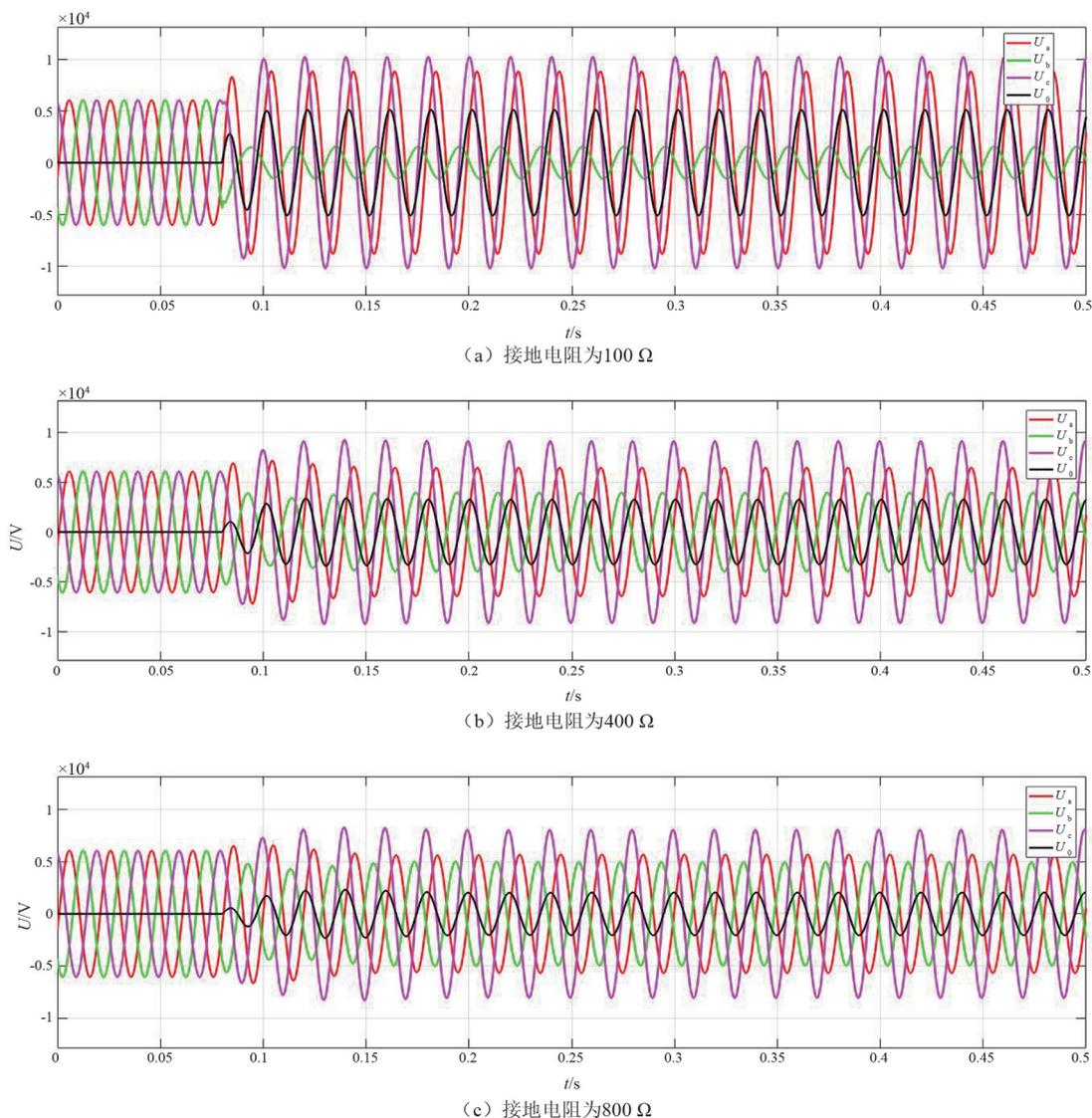


图 9 高阻接地时母线电压波形

由图 9 可知:发生单相接地故障时,随着 B 相接地电阻的增大,故障相剩余电压逐渐增大;非故障相电压的增幅呈减小趋势,且两非故障相电压的增幅不同。这是由于 B 相发生金属性短路,中性点电压会沿着 B 相发生偏移,此时 AC 两相电压是对称的;而过渡电阻的存在不仅会影响 B 相的故障电流、中性点故障电流以及中性点电压的大小,还会影响其相位,导致中性点的偏移不再沿原来 B 相的方向,使 AC 两相电压产生如图所示的现象。仿真结果与实测结果具有较好的一致性。

## 4 结 论

通过对一起 10 kV 系统长时间过电压引发的连续接地短路故障进行介绍,定性地分析了该故障的

录波波形;并利用 Matlab 搭建 10 kV 谐振接地系统,得出对应故障情况下的母线电压,为以后研究小电流接地系统发生单相接地故障时选线和定位提供参考。针对 10 kV 谐振接地系统提出以下减小单相接地故障影响范围的建议:

- 1) 使用合适的消弧线圈在线调挡方式,以应对间歇性接地故障;
- 2) 选用适宜的故障选线策略,快速准确地切除故障线路,避免系统长时间过电压;
- 3) 采用效果较好的绝缘监测装置对电缆的绝缘情况进行监视。
- 4) 重视日常维护工作,在故障发生前做好预防措施与应急措施,以此来降低单相接地故障所产生的损失,确保配电网的安全、稳定运行。

## 参考文献

- [1] 姜博,董新洲,施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [2] 董新洲,王珺,施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.
- [3] 王珺,董新洲,施慎行. 配电线路单相接地行波保护的实现与试验[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 172-178.
- [4] 张慧芬,桑在中. 架空线单相断线接地复故障分析[J]. 中国电力, 2013, 46(2): 65-71.
- [5] 李帆,李阳林,张宇,等. 架空输电线路涉鸟故障分析与防范[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 92-99.
- [6] 蒋文超. 中性点接地方式在电力系统中的作用及意义[J]. 中国科技博览, 2010, 12(30): 387-388.
- [7] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [8] 郭丽伟,薛永端,徐丙垠,等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.
- [9] 张利,杨秀媛,王丽婕,等. 中性点不接地系统单相接地故障定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4069-4076.
- [10] 余斌,尹项根,朱维钧,等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 72-79.
- [11] 蔡德福,施通勤,周鲲鹏,等. 鄂西电网受灾原因及抗灾能力提升措施[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 96-103.
- [12] 阎博,张昊,郭子明,等. 基于多源数据融合的电网故障综合分析 with 智能告警技术研究与应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 39-46.
- [13] 贾鹏飞. 基于 Matlab 仿真的谐振接地系统单相接地故障分析[J]. 现代电子技术, 2012(23): 200-202.
- [14] 董晓刚,邵玉槐,郑宇明,等. 消弧线圈接地系统单相故障选线的研究[J]. 太原理工大学学报, 2005, 22(2): 75-77.
- [15] 张新一. 电力系统间歇性接地故障识别方法的探究[J]. 山东商业职业技术学院学报, 2018, 91(2): 99-102.
- [16] 李辉,唐轶,孙常青. 谐振接地系统单相接地故障仿真分析[J]. 工矿自动化, 2012(1): 51-55.
- [17] 陈景龙,王聪. 小电流接地系统单相接地故障分析[J]. 山东电力技术, 2017, 34(7): 32-36.
- [18] 林林,金震. 配电网单相接地故障定位研究[J]. 中国科技信息, 2012, 20(23): 98-99.
- [19] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
- [20] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
- 作者简介:**  
 卫佳奇(1992),女,工程师,研究方向为电力系统继电保护;  
 袁明哲(1985),男,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护及信号处理在电力系统中的应用;  
 陈翔(1991),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护及电力设备运行维护;  
 令狐静波(1993),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护及二次系统运行状态评估;  
 曹柯(1985),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护;  
 许立志(1981),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护。  
 (收稿日期:2022-08-12)
- (上接第 16 页)
- [15] Hitachi Energy. Hitachi Energy collaborates with Eversource to install the first Econiq™ 420-kilovolt circuit-breaker in the US[EB/OL].(2022-8-31)[2022-12-10].<https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/08/hitachi-energy-collaborates-with-eversource-to-install-the-first-econiq-420-kilovolt-circuit-breaker-in-the-us>.
- [16] Korea Electric Newspaper. LS Electric won Korea's first 170 kV eco-friendly gas insulated switchgear business[EB/OL].(2022-10-18)[2022-12-10].<https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=309969>.
- [17] S&C Electric Company. S&C Electric Company Introduces New Sustainable Switchgear Design[EB/OL].(2021-06-14)[2022-12-10].<https://www.sandc.com/en/news/sc-news/sc-electric-company-introduces-new-sustainable-switchgear-design>.
- [18] 肖淞,石生尧,林婧桐,等.“碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体 SF<sub>6</sub> 控制策略分析[J/OL].中国电机工程学报:1-23[2022-12-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220413.0835.002.html>.
- [19] 厦门华电开关有限公司.厦门华电 Airing 环保型负荷开关方案助力云南曲靖电网打造“绿色电网”[EB/OL].(2021-11-16)[2022-12-10].<https://www.huadianswg.com.cn/news/766.html>.
- [20] 中国电力网.国内首台(套)110千伏 C4 环保气体 GIS 设备在上海投运[EB/OL].(2022-12-07)[2022-12-10].<http://www.chinapower.com.cn/dww/sbdt/20221207/178540.html>.
- 作者简介:**  
 靳梦磊(2000),男,硕士研究生,研究方向为环保绝缘气体。  
 (收稿日期:2022-12-30)