

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221626

# 考虑参数不对称的配电网单相接地故障柔性消弧方法

丁敬明<sup>1</sup>, 邹贵彬<sup>1</sup>, 周成瀚<sup>1</sup>, 温旭辉<sup>2</sup>, 杨晶晶<sup>2</sup>, 栾国军<sup>2</sup>

(1. 山东大学, 山东 济南 250061; 2. 国网潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021)

**摘要:** 为了解决配电网参数不对称导致的中性点位移过电压以及消弧不彻底的问题, 在配电网正常运行时利用闭环控制对中性点电压进行调控, 自动跟踪配电网结构参数的变化, 实现不平衡电压的快速精准抑制。设计注入电流反馈控制环节, 结合不平衡电压调控过程以及故障后的零序电流和零序电压, 仅注入一次电流便可实现故障辨识、故障选相并求得故障可靠消弧所需的注入电流参考值。仿真分析验证了闭环控制能够有效跟踪、抑制中性点不平衡电压, 所提柔性消弧方法在系统参数不对称的情况下, 故障判别精度高, 故障消弧效果良好。

**关键词:** 参数不对称; 闭环控制; 故障判别; 故障选相; 柔性消弧方法

## A flexible arc suppression method for a single-phase grounding fault in a distribution network considering parameter asymmetry

DING Jingming<sup>1</sup>, ZOU Guibin<sup>1</sup>, ZHOU Chenghan<sup>1</sup>, WEN Xuhui<sup>2</sup>, YANG Jingjing<sup>2</sup>, LUAN Guojun<sup>2</sup>

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Grid Weifang Power Supply Company, Weifang 261021, China)

**Abstract:** To solve the problems of neutral point displacement overvoltage and incomplete arc suppression caused by distribution network parameter asymmetry, closed-loop control is used to regulate the neutral point voltage during the normal operation of the distribution network. It automatically tracks the changes of the distribution network structure parameters, and realizes rapid and accurate suppression of the unbalanced voltage. An injection current feedback control link is designed. It is combined with the unbalanced voltage regulation process and the zero-sequence current and zero-sequence voltage after the fault. Then fault identification, fault phase selection and the reference value of the injection current required for reliable arc suppression can be achieved by injecting only one current. The simulation analysis shows that the closed-loop control can effectively track and suppress the unbalanced voltage of the neutral point. The proposed flexible arc suppression method has high fault discrimination accuracy and good fault arc suppression when there are asymmetric system parameters.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077124).

**Key words:** parameter asymmetry; closed-loop control; fault identification; fault phase selection; flexible arc suppression method

## 0 引言

我国中压配电网中性点接地方式主要采用不接地或经消弧线圈接地, 当单相接地故障发生时, 由于三相之间依旧保持对称, 系统仍旧可以带故障继续运行 1~2 h<sup>[1-3]</sup>。但随着配电网规模的扩大, 电缆线路的增多, 单相接地故障后的电容电流大幅增加, 如不加以限制, 极有可能破坏电力设备的可靠绝缘,

使单相接地故障发展为情形更加恶劣的相间短路, 严重影响配电系统的安全性与可靠性<sup>[4-6]</sup>。

为了实现配电网接地故障的可靠消弧, 国内外学者进行了大量研究, 按照有无外加注入设备, 可将现有的消弧方法分为无源消弧法和有源消弧法<sup>[7-9]</sup>。消弧线圈和消弧柜是无源消弧法的典型代表。消弧线圈因具有原理简单, 电磁兼容性好等优点, 在我国中压配电网中得到广泛应用。在故障发生后, 消弧线圈产生的感性电流可以补偿故障容性电流, 避免故障点汇集过大的故障电流, 实现对电弧的抑制。然而, 消弧线圈对故障有功分量和谐波分量却没有

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52077124); 国网山东省电力公司科技项目资助(2021A-019)

作用,且它的补偿效果受系统对地参数变化的影响。此外,消弧线圈还存在电感值调节速度慢,易引发系统谐振等不足<sup>[10-12]</sup>。消弧柜是通过在故障后控制母线处故障相直接接地来实现对故障点电压的抑制,该方法响应速度快,工作机制简单,但受负荷的影响较大,当在重载线路上发生远距离、小过渡电阻的故障时,投入消弧柜可能比未投入时的故障电流还要大<sup>[13-14]</sup>。同时,消弧柜还受故障选相的影响,选相错误不仅不能对电弧进行有效抑制,反而会使得故障情形变得更加恶劣<sup>[15]</sup>。

有源消弧法主要是利用逆变器或级联H桥变流器向系统中注入一定大小的电流来对故障点电压或电流进行调控,进而实现接地故障的消弧<sup>[16]</sup>。文献[17]利用有源逆变器从中性点处注入一个大小和相位可调的零序电流来对故障点电压进行控制,破坏电弧持续燃烧的条件,使电弧自行熄灭。文献[18]是在故障后向系统中注入两次电流来确定有源补偿装置的中性点电压控制目标值,但该方法消弧过程繁琐,适用性有待考证。文献[19-22]不需要测量系统对地参数,通过闭环控制将中性点电压调整为负的故障相电源电压,从而钳制故障点电压完成消弧,然而这些方法应用的前提是能够正确选出故障相,上述文献均未提及与消弧方法配套使用的故障选相方法,整体控制流程有待完善。

近年来随着配电网规模的不断发展,电网运行环境变得愈加复杂多变。对于中性点非直接接地系统,由于三相换位不及时、线路老化等原因,三相参数间不再严格对称,这会在系统中性点处产生不平衡零序电压,使线路损耗增加,有功功率传输效率下降,严重时甚至会威胁电力设备以及运维人员的安全<sup>[23-24]</sup>。目前,已有许多学者针对不平衡电压抑制开展研究,提出了诸多方法<sup>[25-27]</sup>。然而在故障消弧过程中,不平衡电压抑制装置会退出运行,消弧装置转而投入运行,但现有消弧装置大多按理想情况进行设计,并没有考虑到系统参数的不对称,这将导致消弧不彻底,故障点仍有较大的电压电流存在,电弧可能会反复重燃。文献[28]在消弧过程中计及了三相参数不平衡的影响,但当系统结构发生变化时,则需要重复注入电流来计算抑制不平衡电压和消弧各自所需的注入电流参考值,实际应用过于繁琐,控制过程有待改进。

本文首先分析了传统消弧方法的原理以及不平衡电压对这类方法产生的影响,考虑在系统正常运行时利用闭环控制实现不平衡电压的跟踪抑制。故障发生后,根据注入电流的变化对故障进行辨识,之后仅需注入一次零序电流,结合故障前后的电气

量即可确定故障相别并求得故障消弧所需的注入电流参考值,进而实现对电弧的抑制。最后,利用搭建的配电网模型对不平衡电压的抑制效果与消弧方法进行了验证,结果表明所提方案可以实现从三相电压的不平衡抑制到故障消弧的一体化控制,设备利用率高,可行性好,故障判别与选相精度高,注入电流参考值后,能够实现故障的可靠消弧。

## 1 传统柔性消弧方法的性能分析

### 1.1 传统柔性消弧方法的原理

图1为配电网等效示意图, $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ 为10 kV侧三相电源电动势, $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 为母线处三相电压, $\dot{U}_N$ 为系统中性点电压。从母线处共引出 $n$ 条线路, $r_{Ax}$ 、 $r_{Bx}$ 、 $r_{Cx}$ 为第 $x$ 条线路的三相对地分布电阻, $C_{Ax}$ 、 $C_{Bx}$ 、 $C_{Cx}$ 为第 $x$ 条线路三相对地分布电容, $x$ 取1,2,..., $n$ 。 $T_0$ 为主变压器, $T_S$ 为隔离变压器, $T_Z$ 为接地变压器。假设单相接地故障发生在C相, $R_f$ 为过渡电阻, $\dot{I}_f$ 和 $\dot{U}_f$ 分别为故障电流和故障电压。传统柔性消弧方法主要利用柔性补偿装置从中性点处注入一个大小、相位可调的零序电流 $\dot{I}_i$ 来补偿故障电流或调控故障点电压进而实现消弧。 $U_{DC}$ 为逆变器直流侧电压, $L_0$ 和 $C_0$ 为连接到逆变器输出端滤波器的电感和电容。

为了便于分析,可将图1变换为图2所示的简化示意图。忽略线路压降,将柔性补偿装置等效为一电流源, $Y_{A\Sigma}$ 、 $Y_{B\Sigma}$ 、 $Y_{C\Sigma}$ 分别为配单网中三相各自总的对地导纳,即 $Y_{\varphi\Sigma} = \sum (1/r_{\varphi\Sigma} + j\omega C_{\varphi\Sigma})$ , $\varphi$ 表示A、B、C三相。

根据图2,利用节点电压法可以写出单相接地故障发生后的关系式。

$$\begin{aligned} \dot{U}_N(Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma} + 1/R_f) = \\ -\dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) - \dot{E}_C/R_f + \dot{I}_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\alpha = e^{j120^\circ}$ ,为移相系数。针对故障相,利用基尔霍夫电压定律,可以写出式(2)所示的电压关系。

$$\dot{U}_f = \dot{E}_C + \dot{U}_N \quad (2)$$

假设系统三相参数完全对称,即 $Y_{A\Sigma} = Y_{B\Sigma} = Y_{C\Sigma}$ ,将式(2)代入式(1),可以求得故障电流的表达式,如式(3)所示。

$$\dot{I}_f = \dot{U}_f/R_f = -\dot{U}_N(Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) + \dot{I}_i \quad (3)$$

为了使电弧可靠熄灭,需要抑制故障点的电压 $\dot{U}_f$ 等于0,代入式(2)即可求得电弧可靠熄灭时的中性点电压参考值。

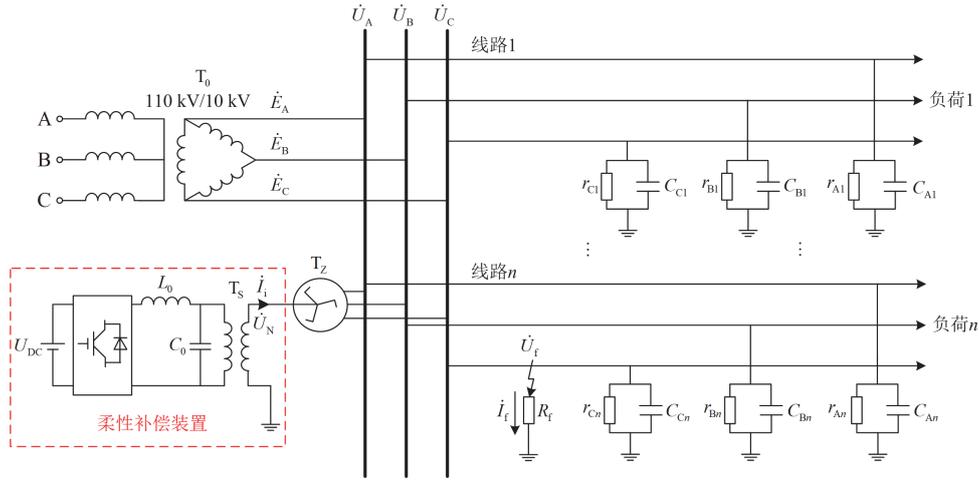


图 1 配电网等效示意图

Fig. 1 Equivalent schematic diagram of the distribution network

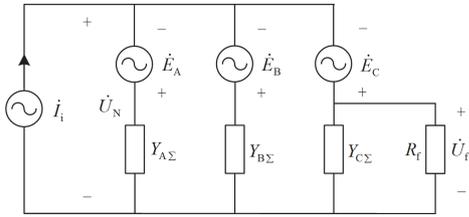


图 2 配电网简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of the distribution network

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_C \quad (4)$$

当故障点电压为 0 时，故障电流也相应地被限制到 0，根据式(3)和式(4)，此时柔性补偿装置的注入电流为

$$\dot{I}_i = -\dot{E}_C(Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可以看出，传统有源消弧方法可以通过调控中性点电压等于负的故障相电源电压来对故障点电压进行抑制，也可以通过注入计算出的理论电流来补偿故障电流。两种消弧方案都需要故障后准确选相，且采用注入电流时，还需要准确测量配电网的对地参数。

### 1.2 参数不对称对传统柔性消弧方法的影响

配电网深入用电负荷中心，运行环境复杂多变，考虑三相换位不及时以及线路老化等原因，三相对地参数并不能保持完全对称，这将会在中性点处产生式(6)所示的不平衡零序电压  $\dot{U}_{un}$ 。

$$\dot{U}_{un} = \frac{-\dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma})}{Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}} \quad (6)$$

不平衡零序电压长期存在会降低电能质量，导致电气设备损耗增加，使用寿命缩短，影响单相负荷的正常运行。为了抑制中性点不平衡电压为 0，

可通过控制有源补偿装置在中性点注入特定电流来实现，结合图 1 和式(6)，理论注入电流  $\dot{I}_0$  大小为

$$\dot{I}_0 = \dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) \quad (7)$$

当发生单相接地故障后，现有的柔性消弧方法普遍忽略了参数不对称的影响，若仍旧按式(5)注入补偿电流，则此时故障电流为

$$\dot{I}_f = -\dot{U}_C(Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) - \dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) \quad (8)$$

可以看出，传统消弧方法在注入理论补偿电流后，由于系统参数的影响，故障点电流并未被抑制为 0，仍然会有较大的残流存在，影响电弧的可靠熄灭。

## 2 考虑参数不对称的柔性消弧方法

### 2.1 考虑参数不对称的故障辨识方法

为了提高系统正常运行时的稳定性，实现故障后故障电流的精准补偿，配电网三相参数不对称的影响不能忽略。

考虑到系统运行时配电网参数和结构可能会发生变化，这里采用双闭环控制对中性点电压进行跟踪抑制，内环设置为电容电流负反馈，控制器选用比例控制器，通过内环的负反馈不仅可以增强输出电压的稳定性，而且对负载波动具有良好的动态抑制效果。外环为电容电压负反馈，并选用准 PR 控制器实现对电压参考值的精准跟踪，进而达到控制中性点电压为 0 的目的。当采用上述控制策略时，从中性点处注入的电流即为式(7)所示大小。

当单相接地故障发生后，由于有源逆变器仍旧以控制中性点电压等于 0 为目标，则此时的注入电

流为

$$i'_0 = \dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) + \dot{E}_C/R_f = i_0 + \dot{E}_C/R_f \quad (9)$$

可看出, 故障后注入电流大小会发生变化, 变化量为  $\dot{E}_C/R_f$ , 该值与过渡电阻的大小成反比, 当过渡电阻较小时, 理论上注入电流可达无穷大, 但由于逆变器容量的限制以及接地电阻对控制系统性能的影响, 注入电流最高可达几百安培。此外, 即便是针对过渡电阻达  $2000 \Omega$  的高阻接地故障, 注入电流幅值变化量仍旧可以达到  $4 \text{ A}$  左右, 故障特征明显。根据以上分析, 构建故障辨识判据, 设置中性点注入电流幅值变化门限值  $|\Delta i_{\text{set}}|$ , 该值应尽可能小, 以反映更高过渡电阻的接地故障, 但同时也应该躲开由于线路投切等非故障因素引起的注入电流变化, 因而根据实际运行情况, 可令  $|\Delta i_{\text{set}}| = 3 \text{ A}$ 。当注入电流幅值变化量超过门限值时, 即判定系统中发生单相接地故障, 同时立即退出对中性点电压的调控程序以防止小电阻接地故障时注入电流的持续增加, 随后开始启动故障消弧程序。

## 2.2 考虑参数不对称的柔性消弧原理

当检测到接地故障后, 抑制中性点电压的有源补偿装置退出运行, 此时的中性点电压  $\dot{U}_{N1}$  为

$$\dot{U}_{N1} = \frac{-\dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) - \dot{E}_C/R_f}{Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma} + 1/R_f} \quad (10)$$

待故障后几个周波, 利用有源补偿装置从系统中性点处注入一个小电流  $i_{\text{in}}$  对故障电流进行初补偿, 该电流的选取应避免对故障电流产生助增效应, 但也不应过小使电气量变化过于微弱, 影响后续注入电流参考值的计算精度。当注入电流  $i_{\text{in}}$  后, 此时的中性点电压  $\dot{U}_{N2}$  为

$$\dot{U}_{N2} = \frac{-\dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) - \dot{E}_C/R_f + i_{\text{in}}}{Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma} + 1/R_f} \quad (11)$$

当计及三相参数不对称时, 需要对式(5)所示的注入补偿电流进行修正, 即

$$i_{i.\text{ref}} = -\dot{E}_C(Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) + \dot{E}_C(\alpha^2 Y_{A\Sigma} + \alpha Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}) \quad (12)$$

联立式(10)一式(12), 消去配电网参数项即可求得抑制故障点电流为0的理论注入电流值, 如式(13)所示。

$$i_{i.\text{ref}} = -\frac{i_{\text{in}}(\dot{U}_{N1} + \dot{E}_C)}{\dot{U}_{N2} - \dot{U}_{N1}} \quad (13)$$

由式(13)可以看出, 故障电流的精准补偿依赖于准确的故障选相, 为了实现故障消弧的一体化控

制, 需要提出与之相适应的选相方法。

## 2.3 单相接地故障选相方法

结合故障前抑制中性点电压不平衡时注入的电流  $i_0$  以及故障后的零序电压电流, 本文提出一种精度较高的故障选相方法。

在上述分析的基础上, 联立式(7)、式(10)、式(11)和式(14)可以求得

$$\frac{\dot{E}_C}{R_f} = -\frac{i_0(\dot{U}_{N2} - \dot{U}_{N1}) + i_{\text{in}}\dot{U}_{N1}}{\dot{U}_{N2} - \dot{U}_{N1}} \quad (14)$$

在式(14)中, 等号左右两边相位相同。等号右边分子分母皆为已知量, 故它的相角  $\theta_0$  可以算出。过渡电阻相角为  $0$ , 因此等号左边相角即为故障相对应电源电压的相角。通过计算式(14)等号右边部分的相角, 然后与三相电源电压相角相比较, 相角相等的一相即判别为故障相。

然而实际运行当中, 由于参数测量误差以及过渡电阻非线性等因素的影响, 式(14)等号右边的相角计算结果可能并不会与故障相电源电压相角严格相等, 因而考虑一定的裕度, 可以构造式(15)所示的故障选相判据。

$$|\angle \dot{E}_\varphi - \theta_0| \leq 30^\circ \quad (15)$$

依次将三相电源电压相角代入式(15), 满足条件的一相即为故障相。

## 2.4 柔性消弧方法整体消弧流程

图3为所提柔性消弧方法的整体控制流程图。

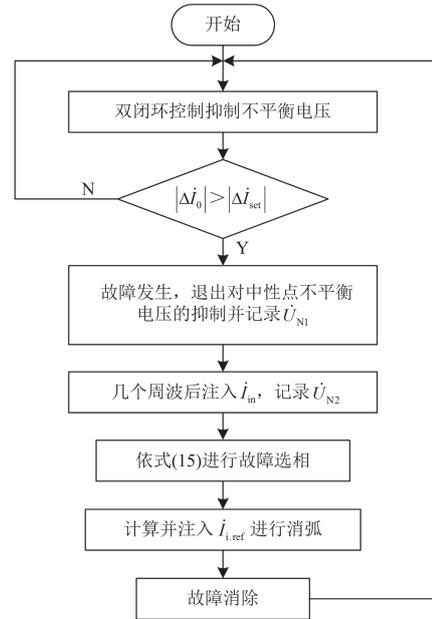


图3 柔性消弧方法动作流程图

Fig. 3 Flow chart of the flexible arc suppression method

在系统正常运行时，利用双闭环控制对中性点电压进行跟踪补偿，抑制由于参数不对称引起的零序不平衡电压。记录稳定时的中性点注入电流  $\dot{I}_0$  并时刻监测该值的变化，当变化量  $|\Delta \dot{I}_0|$  超过所设定的注入电流变化阈值  $|\Delta \dot{I}_{set}|$  时，判定系统中发生单相接地故障，此时立即退出有源补偿装置停止对中性点不平衡电压的抑制。记录故障后的中性点电压  $\dot{U}_{N1}$ ，故障发生几个周波后，利用有源补偿装置向系统中注入一个初始补偿电流  $\dot{I}_{in}$ ，记录此时的中性点电压  $\dot{U}_{N2}$ 。通过上述过程记录的各零序电压和注入电流，利用式(15)可以实现故障选相，根据选出的故障相，在式(13)中代入各数据即可求得故障可靠消弧的理论注入电流  $\dot{I}_{i.ref}$ 。待故障消失后，退出故障电流柔性补偿装置，转至对中性点不平衡电压的抑制流程，配网恢复正常运行。

### 3 闭环控制策略研究

#### 3.1 中性点不平衡电压抑制的控制策略

为了实现对中性点电压的跟踪抑制，本文引入电容电流内环+电容电压外环的双闭环控制策略，控制框图如图 4 所示。

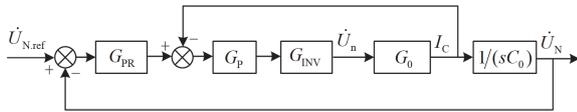


图 4 双闭环控制的结构框图

Fig. 4 Structure diagram of the double closed-loop control

图 4 中： $\dot{U}_{N.ref}$  为中性点参考电压，这里取值为 0； $G_{PR}$  为准 PR 控制器的传递函数； $G_P$  为比例控制器的传递函数； $G_{INV}$  为逆变器的传递函数； $\dot{U}_n$  为逆变器的输出电压； $G_0$  为逆变器输出电压到电容电流之间的传递函数，表达式如式(16)所示。

$$G_0 = \frac{R_{eq} C_0 s}{R_{eq} L_0 (C_0 + C_{eq}) s^2 + L_0 s + R_{eq}} \quad (16)$$

式中， $R_{eq}$  和  $C_{eq}$  分别为配电网对地泄露电阻和对地分布电容转换至逆变器侧的等效值。结合图 4，可以求得电流内环以及电压外环的开环传递函数，分别如式(17)和式(18)所示。

$$G_{in} = G_P G_{INV} G_0 \quad (17)$$

$$G_{ou} = \frac{G_{PR} G_P G_{INV} G_0}{(1 + G_P G_{INV} G_0) C_0 s} \quad (18)$$

针对式(17)，利用根轨迹法确定  $G_P$  的值，式中各参数按照表 1 进行选取。

表 1 系统参数表

Table 1 System parameters

参数	数值	
配电网	总泄露电阻 $R_s/k\Omega$	4.007
	总对地电容 $C_s/\mu F$	41.12
	基频 $f_0/Hz$	50
	过渡电阻 $R_f/\Omega$	100
逆变器	隔离变压器变比 $N$	10000/400
	开关频率 $f_s/kHz$	10
	直流侧电压 $U_{DC}/V$	400
	传递函数 $G_{INV}$	10
	滤波器电感 $L_0/mH$	0.5
	滤波器电容 $C_0/\mu F$	100

图 5 为根据式(17)做出的电流内环的闭环根轨迹图。在自动控制理论中，常用主导极点代替全部的闭环极点来分析系统的性能指标，选取图中的标注点为闭环主导极点，则可令  $G_P = 7.11$ 。

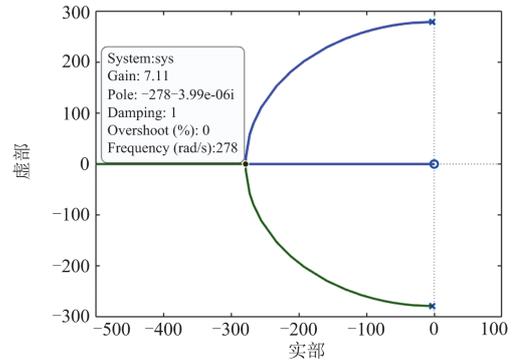


图 5 电流内环的闭环根轨迹图

Fig. 5 Root locus diagram of the current inner loop

外环选用准 PR 控制器实现输出电压对参考电压的准确跟踪，达到无静差控制。准 PR 控制器的传递函数为

$$G_{PR} = K_P + \frac{2K_R \omega_1 s}{s^2 + 2\omega_1 s + \omega_0^2} \quad (19)$$

式中： $K_P$ 、 $K_R$ 、 $\omega_1$  分别为准 PR 控制器的比例系数、谐振系数和谐振截止频率； $\omega_0$  为准 PR 控制器的谐振点，在这里取为  $100\pi$  rad/s。增大  $K_P$  可以提高系统的比例增益，但同时会使得系统抗高频干扰能力变差；增大  $K_R$  会使截止频率以及谐振点附近的增益增大，但相角裕量会减小，影响系统稳定性； $\omega_1$  不仅会影响截止频率的带宽，而且会影响控制器增益，与二者均为正相关。考虑以上影响关系，取  $K_P=15$ ， $K_R=200$ ， $\omega_1 = \pi$  rad/s。此外，为了控制系统的相角裕量位于  $30^\circ \sim 60^\circ$  的稳定区间，改善系

统的暂态性能, 考虑在准 PR 控制器前串联式(20)所示的超前校正环节。

$$G_C = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \quad (20)$$

式中:  $G_C$  为超前校正环节的传递函数;  $T_1$ 、 $T_2$  为时间参数。按照自动控制理论对校正环节中的时间参数进行设置, 令  $T_1 = 2 \times 10^{-4} \text{ s}$ ,  $T_2 = 4 \times 10^{-5} \text{ s}$ , 则加入校正环节后的系统开环传递函数 Bode 图如图 6 所示。

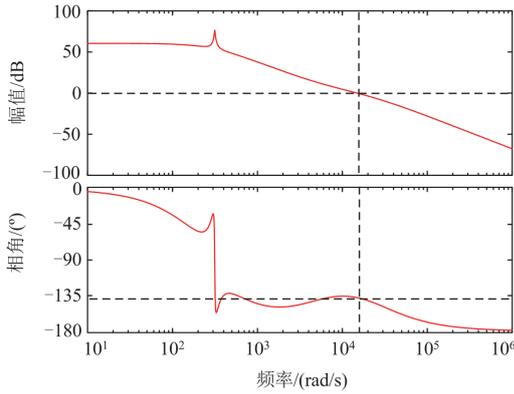


图 6 校正后的系统开环传递函数 Bode 图

Fig. 6 Bode diagram of the corrected system open loop transfer function

由图 6 可以看出, 加入校正环节后, 系统基频处的增益为 76.4 dB, 稳态误差小, 跟踪性能良好; 电压外环的相角裕量为  $42.4^\circ$ , 满足系统运行稳定性的要求; 开环截止频率为  $1.50 \times 10^4 \text{ rad/s}$ , 可以较好地保证系统的低次谐波输出能力。通过上述控制策略, 可以精准地跟踪目标电压参考值, 实现中性点不平衡电压的有效抑制。

### 3.2 补偿电流注入的控制策略

当单相接地故障发生后, 所提柔性消弧方法主要通过注入电流来实现对故障电弧的抑制。为了精确跟踪注入电流参考值, 采用中性点电流负反馈并选用准 PR 控制器, 控制框图如图 7 所示。

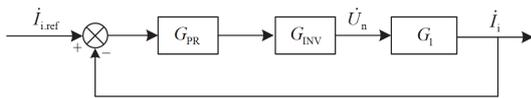


图 7 注入电流的闭环控制结构框图

Fig. 7 Block diagram of the injection current closed-loop control

在图 7 中,  $G_i$  为逆变器输出电压至中性点注入电流之间的传递函数, 其表达式如式(21)所示。

$$G_i = \frac{R_{eq} R'_f C_{eq} s + R_{eq} + R'}{R_{eq} R'_f L_0 (C_{eq} + C_0) s^2 + L_0 (R_{eq} + R'_f) s + R_{eq} R'_f} \quad (21)$$

式中,  $R'_f$  为过渡电阻变换到逆变器低压侧的等效值。结合图 7, 可以求出注入电流闭环控制的开环传递函数, 如式(22)所示。

$$G_{uu} = G_{PR} G_{INV} G_i \quad (22)$$

其中, 准 PR 控制器的谐振截止频率  $\omega_i$  可取  $\pi \text{ rad/s}$ , 比例系数  $K_p$  可按式(23)进行选取。

$$K_p = \frac{1}{G_{INV}} \quad (23)$$

利用劳斯判据对控制系统的稳定性进行分析, 进而确定准 PR 控制器的谐振系数, 注入电流闭环控制系统的特征方程如式(24)所示。

$$1 + G_{uu} = 0 \quad (24)$$

式(24)可以写成如式(25)所示的标准形式。

$$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0 \quad (25)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  为特征方程的各项系数。进一步地, 结合自动控制理论可以列出表 2 所示的劳斯表, 其中,  $X = (BC - AD) / B$ ,  $Y = (XD - BE) / X$ , 代入数据求得表中各项系数的值。可以看出, 当谐振系数  $K_R$  取任意正数时, 劳斯表中第一列元素均大于 0, 系统能够保持稳定。因此,  $K_R$  的选取主要考虑它对基频增益、相角裕量以及系统截止频率的影响。改变  $K_R$  的值, 利用 Bode 图进行分析, 确定满足控制系统性能要求的  $K_R$ , 在本文中可取  $K_R = 50$ 。得到准 PR 控制器的各项参数后, 根据式(22)即可作出加入准 PR 控制器后的开环传递函数 Bode 图, 如图 8 所示。

表 2 闭环特征方程劳斯表

Table 2 Routh array of the closed-loop characteristic equation

特征方程 $1 + G_{uu} = 0$			
$s^4$	$A$	$C$	$E$
$s^3$	$B$	$D$	0
$s^2$	$X$	$E$	0
$s^1$	$Y$	0	0
$s^0$	$E$	0	0

由图 8 可以看出, 加入准 PR 控制器后, 系统的基频增益达到 73.9 dB, 相角裕量为  $43.1^\circ$ , 系统截止频率为  $2.96 \times 10^3 \text{ rad/s}$ , 满足系统稳定性的要求, 可以实现对注入目标电流的准确跟踪。

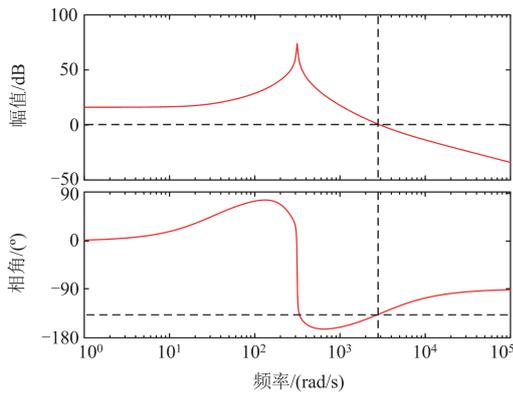


图 8 加入准 PR 控制器后的系统 Bode 图  
Fig. 8 Bode diagram of the system after adding the quasi-PR controller

## 4 仿真验证

### 4.1 仿真模型

为了验证本文所提消弧方法的有效性，在 Matlab/Simulink 中仿照图 1 搭建配电网仿真模型。

配电网电压等级为 10 kV，从母线处共引出 4 条馈线，线路三相总的对地电容和对地电阻如表 3 所示，系统不对称度为 1.289%，阻尼率为 1.932%，对应的系统中的总电容电流和总有功电流分别为 74.583 A 和 1.441 A。假设单相接地故障发生在线路 L4 的 C 相。

表 3 线路参数

Table 3 Line parameters

	A 相	B 相	C 相
对地电容 $C/\mu\text{F}$	13.440	14.040	13.640
对地电阻 $R/\text{k}\Omega$	11.842	12.595	11.668

### 4.2 中性点不平衡抑制与故障判别仿真验证

结合前两节所提的中性点不平衡电压调控方法以及控制策略，对不平衡电压抑制效果进行仿真验证。表 4 为有源补偿装置投入前后三相电压以及中性点电压幅值的大小对比结果，图 9 为整个调控过程中中性点电压的变化图。

表 4 装置投入前后电压大小对比

Table 4 Comparison of voltage before and after the device is put into operation

	V			
	$ \dot{U}_A $	$ \dot{U}_B $	$ \dot{U}_C $	$ \dot{U}_N $
投入前	8238	8065	8193	103.2
投入后	8165	8165	8165	0.019

由表 4 和图 9 可以看出，在对中性点不平衡电压进行抑制之前，由于三相参数不对称，中性点处

会产生高达 103.2 V 的零序电压，若该电压长期存在，将会对设备、人员安全以及系统稳定运行产生不利影响。令不平衡电压抑制装置在 0.125 s 时投入到系统中，可以看到中性点电压在经过短暂的波动后逐步减小至接近于 0。虽然在装置投入初期中性点电压出现突增，但该数值远小于 15% 的电源电压，且持续时间很短，产生的影响可忽略不计。在本仿真中，中性点电压被抑制到  $0.019 \angle 124.60^\circ \text{ V}$ ，对应的注入电流为  $1.337 \angle -47.57^\circ \text{ A}$ ，不平衡电压抑制效果良好。

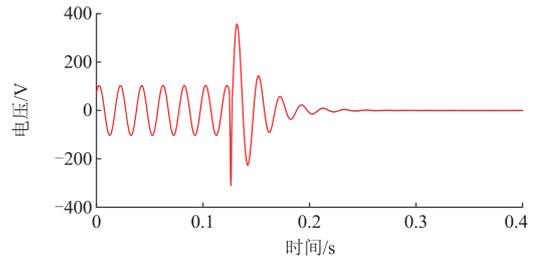


图 9 中性点电压变化图

Fig. 9 Variation diagram of the neutral point voltage

当单相接地故障发生后，中性点注入电流会发生变化，在不同大小过渡电阻下进行仿真，记录注入电流幅值的变化值  $|\Delta i_0|$ ，如表 5 所示。可以看出，注入电流的变化值随过渡电阻的增大而减小。低阻故障下受限于逆变器容量以及控制性能的影响，注入电流不会无限增大。对于过渡电阻达 2000  $\Omega$  的高阻接地故障，注入电流变化值仍旧大于门槛值  $|\Delta i_{\text{set}}|$ ，可以准确判别系统中是否发生单相接地故障，验证了所提方法的有效性。

表 5 故障前后注入电流变化对比

Table 5 Comparison of injected current changes before and after the fault

$R_f/\Omega$	$ i_0 /\text{A}$	$ \Delta i_0 /\text{A}$	$R_f/\Omega$	$ i_0 /\text{A}$	$ \Delta i_0 /\text{A}$
10	210.0	208.8	500	17.3	16.3
50	181.4	180.1	1000	9.1	8.2
100	82.5	81.6	2000	5.1	4.3

此外，考虑到线路投切等非故障因素的影响，中性点注入电流也有可能发生变化，因此改变系统对地参数，分别在 50% 和 150% 大小的  $C_s$  下进行仿真，结果如表 6 所示。可以看出，在非故障因素扰动下，通过双闭环控制仍旧可以可靠地将中性点电压抑制到接近于 0，中性点注入电流会发生变化，但该变化值很小，合理选择门槛值  $|\Delta i_{\text{set}}|$  是不会对故障的准确辨识产生影响的，验证了所提故障判别方法具有较强的适用性。

表 6 不同  $C_s$  下的仿真结果  
Table 6 Simulation results under different  $C_s$

	$ i_0 /A$	$ \dot{U}_N /V$	$ \Delta i_0 /A$	$ \Delta i_0  >  \Delta i_{set} ?$	故障判别
50% $C_s$	0.67	0.04	0.66	N	N
150% $C_s$	2.00	0.02	0.67	N	N

#### 4.3 故障选相仿真验证

根据 2.3 节内容对故障选相方法的性能进行验证, 为了防止过大的  $\dot{I}_{in}$  助增故障电流, 同时避免过小的  $\dot{I}_{in}$  导致电气量变化微弱, 增大计算误差, 令  $\dot{I}_{in}=10\angle 30^\circ A$ 。假设故障均发生在 C 相, 仿真结果如表 7 所示。可以看出, 所提选相方法选相精度高, 在不同的过渡电阻下均能准确地判别出故障相。

表 7 故障选相仿真结果

Table 7 Simulation results of fault phase selection

$R_f/\Omega$	$\theta_0/^\circ$	$ \angle \dot{E}_\phi - \theta_0 /^\circ$			故障相
		$\phi = A$	$\phi = B$	$\phi = C$	
10	119.59	119.59	120.41	0.41	C
50	119.74	119.74	120.26	0.26	C
100	119.89	119.89	120.11	0.11	C
500	119.90	119.90	120.10	0.10	C
1000	119.94	119.94	120.06	0.06	C
2000	119.95	119.95	120.05	0.05	C

#### 4.4 柔性消弧性能仿真验证

确定故障相之后, 即可按照式(13)计算出考虑系统参数不对称的注入电流参考值  $\dot{I}_{i,ref}$ , 采用 3.2 节的控制策略从中性点处注入这一电流进行消弧。为了对比分析本文方法与其他消弧方法的消弧效果, 引入消弧线圈以及未考虑系统参数不对称的柔性消弧方法。其中, 消弧线圈工作在过补偿状态, 补偿度为 10%, 对应的电感值为 0.224 H。改变过渡电阻, 各消弧方法动作后的故障电流如表 8 所示。

由表 8 中数据可以看出, 无论何种消弧方法, 故障电流均会随着过渡电阻的增大而减小。消弧线圈能够大幅抑制故障电流, 但受限于补偿度的影响, 故障点仍然会有较大的故障残流, 当过渡电阻较小时, 故障残余电流会远大于电弧可靠抑制的 5 A 阈值, 电弧难以自然熄灭。对于不考虑系统参数不对称的柔性消弧方法, 动作后故障电流抑制效果良好, 但同样存在着小过渡电阻时剩余电流过大的问题, 考虑到实际运行环境更加恶劣以及过渡电阻的随机性, 该方法难以保证任何情况下电弧的可靠熄灭。分析本文所提的考虑参数不对称的柔性消弧方法, 在不同大小过渡电阻下, 故障电流均被抑制到 1 A 以下, 有效地熄灭了故障电弧并避免了电弧的反复重燃, 具有良好的消弧效果。

表 8 不同消弧方法下的故障电流

Table 8 Fault current under different arc suppression methods

$R_f/\Omega$	故障电流 $ i_f /A$			
	未加消弧装置	引入消弧线圈	未考虑参数不对称	本文方法
10	104.542	11.980	4.239	0.740
50	87.110	11.671	3.535	0.554
100	63.371	11.274	2.572	0.267
500	16.092	8.266	0.653	0.030
1000	8.147	5.841	0.331	0.011
2000	4.094	3.555	0.167	0.002

## 5 结论

针对配电网参数不对称给系统正常运行以及故障消弧带来的一系列问题, 本文提出了一种兼具中性点不平衡电压抑制与接地故障消弧的整体控制方案, 结论如下:

1) 不平衡电压抑制和故障消弧可以共用一套单相有源逆变器, 设备利用率大大提高, 降低了投资成本。

2) 本文设计了电容电压外环加电容电流内环的双闭环控制策略, 对中性点不平衡电压进行跟踪抑制, 能够适应配网结构参数变化, 提升了系统正常运行时的稳定性。

3) 本文结合故障前后中性点电压和注入电流, 提出了一种故障辨识和故障选相方法, 利用注入电流负反馈跟踪理论补偿电流对故障电流进行精准补偿, 实现电弧的可靠熄灭。后续将搭建实物模型, 对所提方法的有效性及其可行性进行验证, 为后续工程实用化提供理论支撑。

## 参考文献

- [1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 叶远波, 汪胜和, 谢民, 等. 高阻接地故障时消弧线圈并联小电阻接地的控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 181-186.  
YE Yuanbo, WANG Shenghe, XIE Min, et al. Study on the control method of high impedance faults in the neutral via arc suppression coil paralleled with a low resistance grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 181-186.
- [3] 徐铭铭, 高淑萍, 常仲学, 等. 基于模型识别的消弧线圈接地系统单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 73-78.  
XU Mingming, GAO Shuping, CHANG Zhongxue, et al. Model recognition based single-phase earthed faulty line

- selection method of Petersen coil grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 73-78.
- [4] ZANG Lindong, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A d-axis based current differential protection scheme for an active distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2022, 7(2): 338-348.
- [5] 刘健, 王毅钊, 张小庆, 等. 配电网单相接地故障处理保护化关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 18-23.  
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Key technologies on single-phase earthed fault protection for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 18-23.
- [6] 白浩, 黄升平, 潘姝慧, 等. 配电网中性点电压主动调压的接地故障零序电流多判据选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 105-113.  
BAI Hao, HUANG Shengping, PAN Shuhui, et al. Zero sequence current multi-criteria line selection method based on active regulation of neutral voltage in distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 105-113.
- [7] 曾祥君, 卓超, 喻锬, 等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降电压消弧与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1523-1534.  
ZENG Xiangjun, ZHUO Chao, YU Kun, et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1523-1534.
- [8] 周兴达, 陆帅, 陈杨明, 等. 基于 SVG 两相电流注入的配电网单相接地故障消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 142-149.  
ZHOU Xingda, LU Shuai, CHEN Yangming, et al. Single-phase-to-ground fault arc-extinguishing method for distribution network based on SVG two-phase current injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 142-149.
- [9] 潘姝慧, 白浩, 周长城, 等. 配电网新型消弧技术综述[J]. 供用电, 2022, 39(2): 42-47, 64.  
PAN Shuhui, BAI Hao, ZHOU Changcheng, et al. Review of novel arc-suppression technology in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 42-47, 64.
- [10] 孙成勋, 桑振华, 杨晓瑛, 等. 基于定相增量法的消弧线圈新型调谐方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 105-108.  
SUN Chengxun, SANG Zhenhua, YANG Xiaoying, et al. A new tuning method of the arc-suppression coil based on the phasing increments[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(10): 105-108.
- [11] 王朋, 陈柏超, 周洪, 等. 非连续铁心结构磁控消弧线圈的稳态建模与优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5606-5614.  
WANG Peng, CHEN Baichao, ZHOU Hong, et al. Steady-state modeling and optimal design method of magnetic controllable Petersen coil with discontinuous core structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5606-5614.
- [12] 庞清乐, 孙同景, 穆健, 等. 气隙调感式消弧线圈控制系统的设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 8-10.  
PANG Qingle, SUN Tongjing, MU Jian, et al. Design of air gap inductance regulation arc suppression coil control system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 8-10.
- [13] 赵军, 阮琦, 李景禄. 考虑线路压降的快速接地开关消弧性能及应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 158-164.  
ZHAO Jun, RUAN Qi, LI Jinglu. Arc eliminating performance and application of fast grounding switch considering line voltage drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 158-164.
- [14] 刘健, 田晓卓, 李云阁, 等. 主动转移型熄弧装置长馈线重载应用问题分析[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1105-1110.  
LIU Jian, TIAN Xiaozhuo, LI Yunge, et al. Application analysis of active transfer type arc-extinguishing device under long feeder line and heavy load[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1105-1110.
- [15] CHEN Kunyi, XIAO Xianyong. Variable impedance fault current bypass circuit for fault arc suppression in distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(18): 4214-4221.
- [16] 王鹏, 冯光, 王晗, 等. 基于 PWM 可控变换器的接地残流全补偿控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 110-118.  
WANG Peng, FENG Guang, WANG Han, et al. A residual current compensation control method based on a PWM-controlled converter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 110-118.
- [17] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-143.  
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.

- [18] 游建章, 郭谋发, 蔡文强, 等. 配电网单相接地故障柔性自适应消弧新方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 146-153.  
YOU Jianzhang, GUO Moufa, CAI Wenqiang, et al. Novel flexible and adaptive arc suppression method for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 146-153.
- [19] 陈锐, 周丰, 翁洪杰, 等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 128-133.  
CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Active arc-suppression method based on double closed-loop control under single-phase grounding faults in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 128-133.
- [20] WANG Wen, ZENG Xiangjun, YAN Lingjie, et al. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4561-4570.
- [21] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 142-149.  
PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 142-149.
- [22] 游建章, 郭谋发. 含四桥臂 H 桥变流器的不对称配电网综合补偿方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2849-2858.  
YOU Jianzhang, GUO Moufa. Comprehensive compensation method for asymmetric distribution network with four-arm H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2849-2858.
- [23] 刘宝稳, 马宏忠. 零序电压产生机理及过渡电阻测量和选相方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1444-1449.  
LIU Baowen, MA Hongzhong. Transition resistance measurement and fault phase selection under single-phase ground fault based on producing mechanism of zero-sequence voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1444-1449.
- [24] WANG Wen, YAN Lingjie, ZENG Xiangjun, et al. Principle and design of a single-phase inverter-based grounding system for neutral-to-ground voltage compensation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(2): 1204-1213.
- [25] 李晓波, 蒋峰景, 李康, 等. 采用改进有源补偿技术的中性点电压柔性控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 111-117, 124.  
LI Xiaobo, JIANG Fengjing, LI Kang, et al. Flexible control method of neutral point voltage using improved active compensation technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 111-117, 124.
- [26] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.  
ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 61-69.
- [27] 谢菁, 薛永端, 徐丙垠. 小电流接地系统不对称电压有源补偿控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 115-121.  
XIE Jing, XUE Yongduan, XU Bingyin. An active compensation and control method of asymmetrical voltage in non-solidly grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 115-121.
- [28] 刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 等. 不平衡零序电压快速精准抑制与电压消弧全补偿优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 645-654.  
LIU Baowen, ZENG Xiangjun, ZHANG Huifen, et al. Optimal control method for accurate and fast suppression of unbalanced zero-sequence voltage and voltage arc suppression full compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 645-654.

收稿日期: 2022-10-13; 修回日期: 2022-11-24

作者简介:

丁敬明(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网单相接地故障消弧; E-mail: 2437204750@qq.com

邹贵彬(1971—), 男, 通信作者, 博士研究生, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制;

周成瀚(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为有源配电网保护与控制。

(编辑 周金梅)