

基于线电压组合调控的配电网单相接地故障消弧与保护方法

许仕杰, 喻锟, 曾祥君, 贺世庚, 邓清波
(长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 长沙 410114)

摘要: 针对非有效接地配电网中单相接地故障消弧与保护的难题, 首先提出了基于线电压组合调控的配电网单相接地故障消弧方法, 利用单相接地故障及调控过程线电压恒定不变特征, 由可调注入变从系统获取三相线电压, 调节注入变压器变比及二次侧开关灵活调控零序电压, 主动抑制故障相电压至 0, 实现接地故障可靠消弧。进一步提出基于线电压组合调控的配电网单相接地故障类型及馈线辨识方法, 分析注入变压器变比改变前后注入电流、零序电压及各馈线零序电流变化特征, 构建了基于相角差及导纳比的接地故障类型及馈线双重辨识判据, 实现接地故障类型及故障馈线灵敏辨识。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中对所提方法进行验证, 仿真结果表明该方法能够有效抑制接地故障电弧, 并实现接地故障类型及馈线的主动灵敏准确辨识, 提升配电网安全可靠运行能力。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 故障消弧; 故障辨识; 相角差

Arc Suppression and Protection Method for Single-Phase Grounding Fault Based on Combined Regulation of Line Voltage in Distribution Network

XU Shijie, YU Kun, ZENG Xiangjun, HE Shigeng, DENG Qingbo

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the problem of arc suppression and protection of single-phase grounding fault in non effectively grounded distribution network, a single-phase grounding fault arc suppression method based on line voltage combination regulation of distribution network is proposed. Using the characteristics of single-phase grounding fault and line voltage constant in the regulation process, the three-phase line voltage is obtained from the adjustable injection transformer from the system, the injection transformer ratio and the secondary side switch are adjusted to flexibly regulate the zero sequence voltage, and the fault phase voltage is actively suppressed to 0, which realizes reliable arc suppression of grounding fault. Furthermore, a single-phase grounding fault type and feeder identification method based on the combined regulation of line voltage in distribution network is proposed. The change characteristics of injection current, zero sequence voltage and zero sequence current of each feeder before and after the change of injection transformation ratio are analyzed. The double identification criteria of ground fault type and feeder based on phase angle difference and admittance ratio are constructed to realize the sensitive identification of ground fault type and fault feeder. The proposed method is verified in PSCAD/EMTDC simulation environment. The simulation results show that the method can effectively suppress the grounding fault arc, realize the active, sensitive and accurate identification of grounding fault types and feeders, and improve the safe and reliable operation ability of distribution network.

Key words: distribution network; single-phase grounding fault; fault arc suppression; fault identification; phase angle difference

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52037001); 湖南省教育厅资助项目(22A0231)

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52037001); Hunan Provincial Education Department Funding (22A0231).

0 引言

配电网作为电力系统的末端环节直接面向用户,承担着分配电能的重要功能,因此对其安全运行和可靠性有着极高的要求。然而,配电网结构繁杂、分支众多,且运行工况多变,容易发生线路故障^[1-2]。据统计单相接地故障在所有线路故障中占比超过 80 %^[3]。

为抑制此类接地故障,我国 6~66 kV 中压配电网主要采用中性点非有效接地方式(如中性点不接地、经消弧线圈接地等)。但随着配电网规模的扩大以及线路电缆化率的提高,电容电流急剧增加,使得接地故障电弧难以自行熄灭,容易引发火灾及人身触电等恶性事故,对人民生命和设备安全构成威胁^[4-5]。同时,若接地故障不能被准确识别并及时保护切除,配电网带故障长时间运行,容易引发大面积、长时间的停电事故,严重影响电网的安全性和供电的可靠性,造成巨大的社会经济损失。

根据调控目标的差异,现有的配电网接地故障消弧方法可分为两类:电流消弧法和电压消弧法^[6]。电流消弧法以故障电流作为调控目标,通过补偿或抑制接地故障残流达成故障消弧的目的。最早是德国的彼得生提出在中性点安装消弧线圈以补偿故障电流的方法,然而,随着电网电缆化建设进程的加快故障残流增大,自然熄弧难以实现^[7]。

为此,国外提出了气隙可调式和直流偏磁式消弧线圈技术^[8-9]、连续可控阻抗接地消弧技术以及静止连续可控接地阻抗限流消弧接地补偿技术^[10];与此同时,我国也研发了在线分级调匝式、直流磁阀式、调容式和高短路阻抗变压器、晶闸管控制的接地阻抗变压器等一系列消弧线圈装置^[11-15],能够针对配网电容电流大小实现中性点接地阻抗的自动跟踪调节。

然而,上述技术仅能对故障电流的无功功率分量予以补偿,无法对故障电流的有功功率分量及谐波分量进行补偿,消弧效果仍有待进一步提高。近年来,伴随电力电子技术的迅猛发展,为达成故障电流的全面补偿,瑞典中立公司、中国矿业大学以及福州大学等单位相继提出了残流补偿装置、零残流消弧线圈及三相级联 H 桥注入补偿等消弧技

术^[16-18]。此类技术虽能够灵活调控注入电流从而实现故障电流的全面补偿,但需依赖系统对地参数的精准测量且控制相对复杂。

电压消弧法作为新的发展方向和研究热点,其以故障相电压为调控目标,抑制故障点相电压至重燃弧电压以下,使故障点绝缘介质恢复速度快于故障电压恢复速度,从本源上阻止电弧重燃^[3]。因此,根据电压消弧机理,文献[19-20]提出基于可控电压源的配电网柔性接地消弧技术,直接通过有源逆变器灵活调控零序电压便可将故障电压直接抑制为零,破坏故障电弧重燃条件。但需应用成本高昂电力电子设备及器件且可靠性不高,难以在配电网中得到大范围推广。为此,接地故障相转移技术应运而生^[21-22],其通过在站内设置旁路将故障相母线直接接地控制故障电压为 0,从而实现故障消弧。但消弧过程中无法灵活调控电压,且若选相错误可能发展为相间故障,造成两相接地,危害扩大。文献[23]提出了基于接地变压器绕组分档调压干预的消弧方法,通过将分档调压接地变档位抽头接地,分级灵活调控故障相电压实现接地故障降压消弧,但该方法所需的特种变压器仍在进行研发测试。文献[24]提出了配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧方法,通过提取接地变压器二次侧系统线电压并调节注入变压器变比,主动调控零序电压并将故障点电压降至燃弧电压以下从而实现故障消弧,但该方法只能应用于含 Z 型接地变场合。

针对上述问题,本文提出了基于线电压组合调控的配电网主动降压消弧方法。该方法借助可调注入变从系统获取三相线电压,通过调节注入变变比以及二次侧开关,灵活调控零序电压,主动将故障相电压抑制至 0,从而实现接地故障 100 %可靠消弧。此外,本文进一步提出了基于线电压组合调控的接地故障类型及馈线主动辨识方法。此方法通过对注入变变比改变前后注入电流、各馈线零序电流相角以及导纳比的变化特征进行研判,能够灵敏地辨识故障类型及故障馈线。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中搭建了典型 10 kV 配电网的单相接地故障仿真模型,并在多种接地故障工况下开展仿真测试,验证了本文所提方法的有效性与可行性。

1 配电网电压组合调控消弧方法

非有效接地配电网电压组合调控拓扑结构如图 1 所示, $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ 为系统三相电源电动势, C_α 为 α 相对地电容 ($\alpha = A, B, C$), R_α 为 α 相对地电阻, T1—T3 为单相可调注入变压器, 输入为系统线电压, K1—K7 为可调注入变二次侧投切开关, 初始状态均为断开, 可调注入变 T1—T3 与开关 K1—K7 共同组成线电压组合调控装置, Y_N 为中性点对地导纳, $\dot{I}_{in}$ 为注入电流, $\dot{U}_0$ 为系统零序电压。

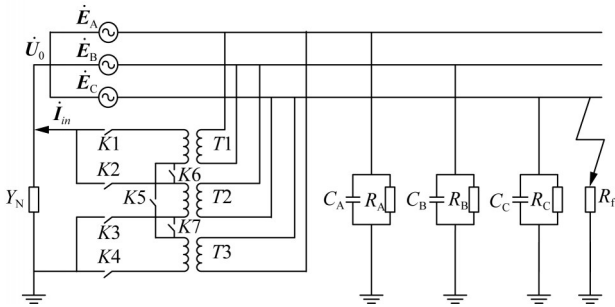


图 1 非有效接地配电网电压组合调控原理图

Fig. 1 Principle diagram of combined regulation of line voltages in non-effective grounding distribution network

假设配电网 α 相 ($\alpha = A, B, C$) 发生单相接地故障, 令 $Y_\alpha = Y_0$ ($Y_\alpha = 1/R_\alpha + j\omega C_\alpha$), ω 为系统工频角频率, 根据图 1 由节点电压定律可得:

$$\dot{I}_{in} = \dot{U}_0(3Y_0 + Y_N) + (\dot{U}_0 + \dot{E}_\alpha)/R_f \quad (1)$$

式中: $\dot{I}_{in}$ 为注入电流相量; $\dot{U}_0$ 为系统零序电压相量; $\dot{E}_\alpha$ 为 α 相电源电动势相量; R_f 为故障过渡电阻。

根据图 1 可得, 线电压组合调控装置输出电压 $\dot{U}_{in}$ 为:

$$\dot{U}_{in} = \dot{U}_0 = \lambda_1 \dot{U}_{AB} + \lambda_2 \dot{U}_{BC} + \lambda_3 \dot{U}_{CA} \quad (2)$$

式中: $\lambda_1 \dot{U}_{AB}$ 、 $\lambda_2 \dot{U}_{BC}$ 、 $\lambda_3 \dot{U}_{CA}$ 分别为可调注入变压器 T_1 、 T_2 、 T_3 二次侧输出电压; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为可调注入变 T_1 、 T_2 、 T_3 变比; $\dot{U}_{AB}$ 、 $\dot{U}_{BC}$ 、 $\dot{U}_{CA}$ 为配电网线电压。因此, 通过改变可调注入变变比及与二次侧开关配合可实现线电压组合调控装置输出电压灵活调控, 进而灵活控制零序电压, 等效于一可控电压源。因此, 图 1 配电网接地故障等效电路模型如图 2 所示。

根据接地故障电压消弧机理, 通过调控故障相电压降低到故障电弧重燃电压以下, 迫使熄弧峰压

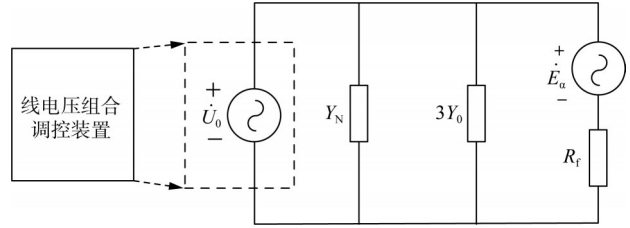


图 2 配电网接地故障等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of grounding fault in distribution network

U_{pv} 小于弧道介质的恢复强度, 可实现接地故障电弧有效抑制。由式(1)可得, 故障相电压 $\dot{U}_\alpha = \dot{U}_0 + \dot{E}_\alpha$, ($\dot{E}_\alpha$ 为故障相电动势), 若通过 3 个可调注入变对线电压调控组合, 控制 $\dot{U}_0 = -\dot{E}_\alpha$, 则可将故障相电压直接抑制为 0, 破坏了故障电弧重燃条件, 能有效可靠消弧, 并消除故障电流, 由此可得不同相接地故障时线电压组合调控消弧表达式如式(3)所示 ($\dot{U}_{0\alpha}$ 为 α 相故障时的零序电压)。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0A} &= \frac{2}{3} \dot{U}_{CA} + \frac{1}{3} \dot{U}_{BC} = -\dot{E}_A \\ \dot{U}_{0B} &= \frac{2}{3} \dot{U}_{AB} + \frac{1}{3} \dot{U}_{CA} = -\dot{E}_B \\ \dot{U}_{0C} &= \frac{2}{3} \dot{U}_{BC} + \frac{1}{3} \dot{U}_{AB} = -\dot{E}_C \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\dot{U}_{0A}$ 、 $\dot{U}_{0B}$ 、 $\dot{U}_{0C}$ 分别为 A、B、C 相故障时的零序电压相量; $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ 分别为 A、B、C 相电源电动势相量。

结合式(3)得不同相接地故障时线电压组合调控降压消弧原理相量图如图 3 所示。

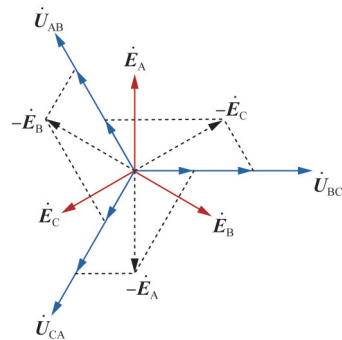


图 3 线电压组合调控降压消弧原理相量图

Fig. 3 Phasor diagram of line voltage combination regulation step-down arc suppression principle

因此, 提出线电压组合调控消弧原理: 利用系统单相接地故障前后线电压恒定不变的特征, 接地故障发生后调控相应可调注入变档位调节变比, 并

投切二次侧相应开关控制零序电压为故障相电源反相电压, 将故障相电压抑制至 0 从而有效消除故障电弧, 阻止电弧重燃。

当配电网 A 相发生单相接地故障时通过分别调节可调注入变 T_2 、 T_3 变比 λ_2 、 λ_3 为 $1/3$ 、 $2/3$, 并投切闭合二次侧开关 K2、K4、K7, 可将零序电压调控至 $-\dot{E}_A$, 迫使故障 A 相电压为 0, 从而有效抑制故障电弧。B、C 相发生接地故障时, 原理分析类似, 通过投入相应可调注入变, 调节其档位, 并投切二次侧对应开关, 主动将故障相电压降至 0, 从而实现 B、C 相接地故障时可靠消弧。可调注入变变比及二次侧开关投切情况如表 1 所示。

表 1 可调注入变变比及二次侧开关投切情况

Tab. 1 Adjustable injection ratio and switching of secondary side switch

接地故障相别	投入可调注入变压器(变比)	二次侧投切开关
A 相	$T_2(1/3)$ 、 $T_3(2/3)$	K2、K4、K7
B 相	$T_1(2/3)$ 、 $T_3(1/3)$	K1、K4、K5
C 相	$T_1(1/3)$ 、 $T_2(2/3)$	K1、K3、K6

2 配电网线电压组合调控单相接地故障保护方法

2.1 单相接地故障类型辨识方法

通过线电压组合调控装置对故障进行消弧后, 延时 5 s 改变不同相接地故障时所投入可调注入变档位, 为减少注入变调节台数均调节变比为 $1/3$ 。对不同相接地故障进行故障类型辨识时投入可调注入变变比变化情况如表 2 所示。

表 2 可调注入变压器变比变化情况

Tab. 2 Variation condition of adjustable injection ratio

接地故障相别	变档前可调注入变(变比)	变档后可调注入变(变比)
A 相	$T_2(1/3)$ 、 $T_3(2/3)$	$T_2(1/3)$ 、 $T_3(1/3)$
B 相	$T_1(2/3)$ 、 $T_3(1/3)$	$T_1(1/3)$ 、 $T_3(1/3)$
C 相	$T_1(1/3)$ 、 $T_2(2/3)$	$T_1(1/3)$ 、 $T_2(1/3)$

由表 2 可得改变所投可调注入变压器变比后系统零序电压表达式为:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0A} &= \frac{1}{3}\dot{U}_{CA} + \frac{1}{3}\dot{U}_{BC} = -\frac{\sqrt{3}}{3}\dot{E}_A \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{0B} &= \frac{1}{3}\dot{U}_{AB} + \frac{1}{3}\dot{U}_{CA} = -\frac{\sqrt{3}}{3}\dot{E}_B \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{0C} &= \frac{1}{3}\dot{U}_{BC} + \frac{1}{3}\dot{U}_{AB} = -\frac{\sqrt{3}}{3}\dot{E}_C \angle 30^\circ\end{aligned}\quad (4)$$

结合式(4)绘制线电压组合调控换挡后所得零序电压相量图如图 4 所示, δ 为换挡前后零序电压相角变化量。

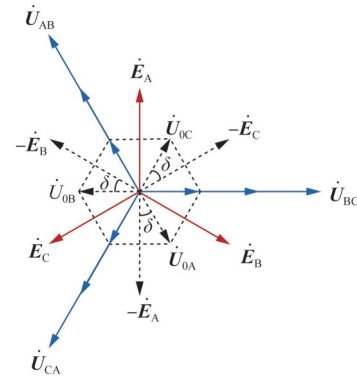


图 4 换挡后零序电压相量图

Fig. 4 Zero sequence voltage phasor diagram after shift

因此, 由式(3)—(4)可得换挡前后 $\dot{U}_0$ 相角变化量:

$$\begin{aligned}\theta\left(\frac{1}{3}\dot{U}_{CA} + \frac{1}{3}\dot{U}_{BC}\right) - \theta\left(\frac{2}{3}\dot{U}_{CA} + \frac{1}{3}\dot{U}_{BC}\right) &= 30^\circ \\ \theta\left(\frac{1}{3}\dot{U}_{AB} + \frac{1}{3}\dot{U}_{CA}\right) - \theta\left(\frac{2}{3}\dot{U}_{AB} + \frac{1}{3}\dot{U}_{CA}\right) &= 30^\circ \\ \theta\left(\frac{1}{3}\dot{U}_{BC} + \frac{1}{3}\dot{U}_{AB}\right) - \theta\left(\frac{2}{3}\dot{U}_{BC} + \frac{1}{3}\dot{U}_{AB}\right) &= 30^\circ\end{aligned}\quad (5)$$

式中: $\frac{1}{3}\dot{U}_{CA} + \frac{1}{3}\dot{U}_{BC}$ 、 $\frac{1}{3}\dot{U}_{AB} + \frac{1}{3}\dot{U}_{CA}$ 、 $\frac{1}{3}\dot{U}_{BC} + \frac{1}{3}\dot{U}_{AB}$ 为换挡前的相角; $\frac{2}{3}\dot{U}_{CA} + \frac{1}{3}\dot{U}_{BC}$ 、 $\frac{2}{3}\dot{U}_{AB} + \frac{1}{3}\dot{U}_{CA}$ 、 $\frac{2}{3}\dot{U}_{BC} + \frac{1}{3}\dot{U}_{AB}$ 为换挡后的相角。

由式(5)可知, 换挡前后 $\dot{U}_0$ 相角变化量 δ 为 30° , 又换挡后故障相电压 $\dot{U}_\alpha$ 如式(6)所示, 其相位超前零序电压 $\dot{U}_0$ 相位 120° 。

$$\dot{U}_\alpha = \dot{U}_0 + \dot{E}_\alpha = -\frac{\sqrt{3}}{3}\dot{E}_\alpha \angle 150^\circ \quad (6)$$

根据上述分析可得中性点不接地、经消弧线圈接地方式下换挡前后注入电流与零序电压相量图如图 5 所示(以 A 相故障为例), 令换挡前后注入电流分别为 $\dot{I}'_m$ 、 $\dot{I}''_m$, 令换挡前后零序电压分别为 $\dot{U}'_0$ 、

$\dot{U}_0''$, 换挡后系统零序总阻抗电流为 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$, 故障电流为 $\dot{I}_{R_f}''$, 定义 $\dot{I}_{in}$ 相角变化量 $\Delta\theta(\dot{I}_{in}) = \theta(\dot{I}_{in}'') - \theta(\dot{I}_{in}')_0$ 。

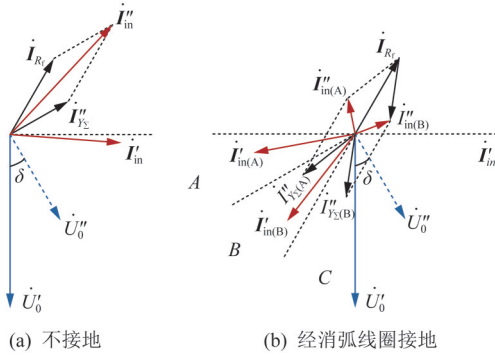


图 5 注入电流与零序电压相量图

Fig. 5 Phasor diagram of injection currents and zero sequence voltages

由图 5 可知, 在中性点不接地方式下发生故障时瞬时性故障换挡后 $\dot{I}_{R_f}''$ 为 0, 即 $\dot{I}_{in}''$ 等于 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$, $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 等于 30° ; 永久性故障时 $\dot{I}_{in}''$ 为 $\dot{I}_{R_f}''$ 与 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 合成矢量, 如图 5(a) 所示, 其相位超前 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 相位, 即 $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 大于 30° 。

当经消弧线圈接地时, 系统欠补偿状态下与不接地方式下 $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 变化情况相同; 系统处于过补偿状态时将换挡前零序电压相位 $0 \sim 90^\circ$ 滞后区间等分成 A、B、C 三部分, 如图 5(b) 所示。当系统过补偿度变化时, 根据式(1)可知 $\dot{I}_{in}'$ 可位于 A、B、C 任意区间。对于瞬时性故障, 在 A、B、C 任意区间内 $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 始终为 30° ; 对于永久性故障, 当注入电流 $\dot{I}_{in}'$ 位于 A 区间内时, $\dot{I}_{in}''$ 始终滞后于 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$, 即 $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 小于 30° ; 当 $\dot{I}_{in}''$ 位于 B 区间内时, $\dot{I}_{in}''$ 超前 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$, 根据 R_f 阻值不同, $\dot{I}_{R_f}''$ 大小不同, 分析可得 $\Delta\theta(\dot{I}_{in}) \in \left(\left(-180^\circ, \theta(\dot{U}_0'/\dot{I}_{in}') - 210^\circ \right) \cup (30^\circ, 180^\circ) \right)$, B 区间内时 $\theta(\dot{U}_0'/\dot{I}_{in}') \in (30^\circ, 60^\circ)$; 当 $\dot{I}_{in}'$ 位于 C 区间时, $\dot{I}_{in}''$ 也始终超前 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$, $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 大于 30° 。而当 $\dot{I}_{in}'$ 位于 A、B 区间重合线上时, $\dot{I}_{in}''$ 与 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 相位相反, 当 $\dot{I}_{R_f}''$ 大于 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 时, $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 为 -150° , 而当 $\dot{I}_{R_f}''$ 小于 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 时, $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 为 30° , 与瞬时性故障一样, 无法对故障类型进行区分。

因此, 为对瞬时性与永久性接地故障进行准确辨识, 需对 $\dot{I}_{in}'$ 位于 A、B 区间重合线上且 $\dot{I}_{R_f}''$ 小于 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 情况进一步分析。此时, 可将式(1)等效为:

$$\dot{I}_{in} = \dot{U}_0(3Y_0 + Y_N + Y_1), Y_1 = \frac{\dot{U}_0 + \dot{E}_\alpha}{\dot{U}_0 R_f} \quad (7)$$

令 $3Y_0 + Y_N + Y_1$ 为等效导纳, Y_0 、 Y_N 分别为线路对地导纳、中性点对地导纳, 定义换挡前后导纳比 $H_1 = \left| \frac{\dot{I}_{in}' \dot{U}_0''}{\dot{U}_0' \dot{I}_{in}''} \right|$, 由于瞬时性故障时 $Y_1 = 0$, 所以瞬时性故障时满足 $H_1 = 1$, 而永久性故障 $0 < H_1 < 1$ 。在其它情形下瞬时性故障时也满足 $H_1 = 1$ 、 $\Delta\theta(\dot{I}_{in}) = 30^\circ$, 永久性故障时满足 H_1 大于 0, $\Delta\theta(\dot{I}_{in}) \neq 30^\circ$ 。

因此, 根据上述分析可设计单相接地故障类型双重辨识判据如下:

$$\begin{cases} \Delta\theta(\dot{I}_{in}) \in (30^\circ - \gamma, 30^\circ + \gamma), H_1 = 1 \text{ 瞬时故障} \\ \Delta\theta(\dot{I}_{in}) \notin (30^\circ - \gamma, 30^\circ + \gamma), H_1 \in (0, 1) \text{ 永久故障} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 为故障前后注入电流相角变化量; H_1 为换挡前后导纳比; γ 为考虑的相角裕度。由故障类型辨识判据可知: 仅当 $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 等于 30° 且 $H_1 = 1$ 时, 判定故障类型为瞬时性故障; 否则, 即为永久性故障。由于配电网接地故障电阻远小于系统对地泄露电阻, 永久性接地故障注入电流相角变化量与 H_1 值特征均较明显, 可精准有效辨识故障类型, 并具备较强的抗过渡电阻能力。

2.2 单相接地故障馈线辨识方法

若故障辨识为永久性接地故障则需对故障馈线进行辨识, 从而进行故障馈线隔离与保护。

配电网非故障馈线零序电流 $3\dot{I}_{0i}$ 、故障馈线零序电流 $3\dot{I}_{0k}$ 表达式如式(9)所示。

$$\begin{cases} 3\dot{I}_{0i} = 3\dot{U}_0 Y_{0i} \\ 3\dot{I}_{0k} = 3\dot{U}_0 Y_{0k} + \frac{(\dot{U}_0 + \dot{E}_\alpha)}{R_f} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Y_{0i} 为非故障馈线单相对地导纳; Y_{0k} 为故障馈线单相对地导纳。

根据式(3)、(4)、(6), 受 R_f 影响, 将可调注入变换挡前后零序电压 $\dot{U}_0$ 代入式(9)可得:

$$\begin{cases} \Delta\theta(3\dot{I}_{0i}) = \Delta\theta(\dot{U}_0) = 30^\circ \\ \Delta\theta(3\dot{I}_{0k}) > \Delta\theta(\dot{U}_0) = 30^\circ \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知, 非故障馈线零序电流 $3\dot{I}_{0i}$ 相角变化量与零序电压 $\dot{U}_0$ 相角变化量一致, 而故障馈线零序电流 $3\dot{I}_{0k}$ 相角变化量大于零序电压 $\dot{U}_0$ 相角变化量, 且不受中性点接地方式影响。

同式(7), 式(9)可等效为式(11), 式中 α 为馈线编号, $\alpha=1, 2, 3$ 。令馈线导纳比 $H_2 = \left| \frac{\dot{I}_{0\alpha} \dot{U}_0''}{\dot{U}_0' \dot{I}_{0\alpha}''} \right|$, 由于正常馈线 Y_2 始终为 0, 故可得 $H_2=1$; 而馈线故障时将换挡前后零序电压代入式(11), 可得 $H_2 < 1$ 。因此。根据正常与故障馈线 H_2 值差异也能对正常馈线与故障馈线进行区分。

$$3\dot{I}_{0\alpha} = 3\dot{U}_0(Y_{0\alpha} + Y_2), Y_2 = \frac{(\dot{U}_0 + \dot{E}_\alpha)}{3\dot{U}_0 R_f} \quad (11)$$

式中: $\dot{I}_{0\alpha}$ 为故障馈线零序电流; $Y_{0\alpha}$ 为故障线路零序导纳。

因此, 综上可得故障馈线双重辨识判据: 可调注入变压器换挡前后若测得某馈线零序电流相角变化量大于零序电压相角变化量 30° 且 H_2 值小于 1, 则可辨识为故障馈线; 否则, 判定为非故障馈线。同故障类型辨识方法一样, 取相角误差裕度 γ 。

2.3 影响因素分析

由式(1)可知, 由于换挡前后零序电压固定, 单相接地故障类型辨识方法主要受中性点接地方式、系统对地参数及过渡电阻影响。由于经消弧线圈接地方式下等效电纳比不接地方式下小, 可更灵敏感知过渡电阻变化。因此, 着重分析不接地方式下故障类型辨识方法影响因素及能力。由于系统对地电纳远大于对地泄露电导, 此处忽略对地泄露电导的影响。因此, 图 5(a)可变换成图 6。

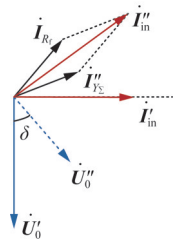


图 6 注入电流与零序电压相量图(不接地)

Fig. 6 Injection current and zero sequence voltage phasor diagram (ungrounded)

由图 6 可知, 当过渡电阻 R_f 一定时, $\dot{I}_{R_f}''$ 一定, $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 随 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 增大而减小, 忽略对地电导后 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 为系统电容电流, 随馈线数量及长度增加而增加; $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 一定时, $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 随 $\dot{I}_{R_f}''$ 增大而增大, $\dot{I}_{R_f}''$ 与 R_f 成反比。又图 6 中 $\dot{I}_{R_f}''$ 超前 $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 30° , 可得:

$$\theta(\dot{I}_{in}'', \dot{I}_{Y_\Sigma}'') = \arctan\left(\frac{0.5G_f}{\sqrt{3}G_f/2 + \omega C_\Sigma}\right) \quad (12)$$

式中: $G_f=1/R_f$; $\dot{I}_{in}''$ 为换挡后注入电流; $\dot{I}_{Y_\Sigma}''$ 为换挡后馈线零序电流; C_Σ 为馈线总对地电容。 $\theta(\dot{I}_{in}'', \dot{I}_{Y_\Sigma}'')$ 与 C_Σ 成反比, 与 G_f 成正比。由于中性点不接地方式下最大允许电容电流不超过 30 A, 为检测故障类型辨识方法的抗过渡电阻能力, 取最大电容电流为 30 A 情况, 则 $C_\Sigma = 1.65 \times 10^{-5}$ F。当 $\theta(\dot{I}_{in}'', \dot{I}_{Y_\Sigma}'')=1^\circ$ 时, 求得 R_f 为 5 361.72 Ω , 当 $\theta(\dot{I}_{in}'', \dot{I}_{Y_\Sigma}'')=0.5^\circ$ 时, 求得 $R_f=10$ 891.39 Ω , 当计及对地泄露电导时 R_f 还将增大。而对于故障馈线辨识方法, 类似于故障类型辨识方法分析, 由于馈线电容要小于系统 C_Σ , 因此, 当 $\theta(3\dot{I}_{0k}'', \dot{I}_{Y_\Sigma}'')=1^\circ$ 或 0.5° 时, 所求得 R_f 均比故障类型辨识方法下的大, 即故障馈线辨识方法抗过渡电阻能力更强。

此外, 故障类型及馈线辨识方法可能受电压及电流互感器测量误差影响: 由于 $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 及 $\Delta\theta(3\dot{I}_{0i})$ 基于相角差表征, 尽管电流互感器存在相角测量误差, 换挡前后相角差距并没有因此改变, 因此不受电流互感器相角误差影响^[25]。互感器幅值测量误差同样不会影响相角判据, 但会影响 H_1 、 H_2 值, 因此, 为确保方法有效性应将互感器幅值测量误差考虑在内。另外, 在实际工程应用中线电压组合装置中可调注入变将线电压变换至二次侧, 存在相角差, 不完全一致, 但一般误差较小。

综上分析, 结合考虑辨识判据抗过渡电阻能力及多种因素的影响, 为防止误判, 确保故障类型及馈线辨识方法有效可行, 取 $\Delta\theta(\dot{I}_{in})$ 及 $\Delta\theta(\dot{I}_{0i})$ 相角差裕度为 1° , H_1 、 H_2 值裕度取 2%。

3 接地故障消弧与保护方法实现流程

基于线电压组合调控的配电网单相接地故障消弧与保护方法实现流程如图 7 所示。

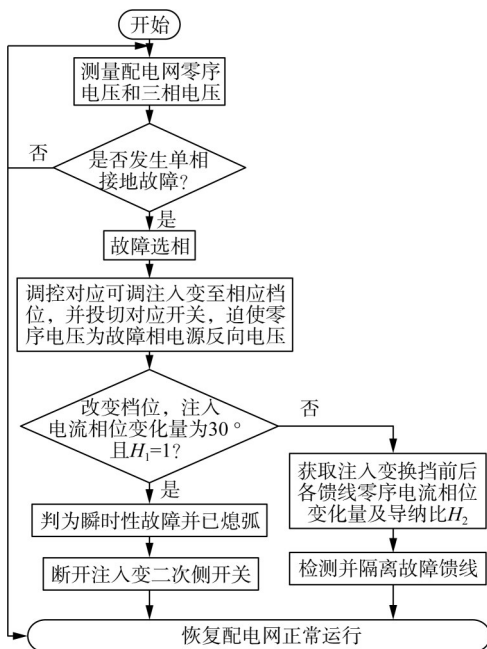


图7 基于线电压组合调控的配电网接地故障消弧与保护方法实现流程

Fig. 7 Realization process of single-phase grounding fault arc suppression and protection method for combined regulation of line voltage in distribution network

首先, 配电网正常运行时连续实时测量配电网零序电压和三相电压, 若零序电压大于相电压 15 % 时, 即检测到发生单相接地故障后, 可根据故障前后的零序电压和相电压相位信号选出故障相^[26]。选相完成后调控对应可调注入变至相应档位, 并投切二次侧相应开关, 强迫零序电压为故障相电源反向电压, 将故障相电压抑制为 0, 消除故障电弧; 延时 5 s 时间改变可调注入变档位, 若注入电流相角变化量与零序电压相角变化量一致等于 30° 且 $H_1=1$, 则辨识为瞬时性接地故障并已熄弧, 断开注入变二次侧开关, 恢复配电网正常运行; 否则, 辨识为永久性接地故障, 再比较可调注入变换挡前后各馈线零序电流相角变化量及馈线导纳比 H_2 , 判定相角变化量大于 30° 及 H_2 小于 1 的馈线为故障馈线, 并隔离故障馈线, 恢复配电网正常运行。

4 仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建如图 8 所示的 10 kV 配电网线电压组合调控仿真模型, 对本文所提基于配电网线电压组合调控的单相接地故障消

弧与保护方法进行仿真验证。

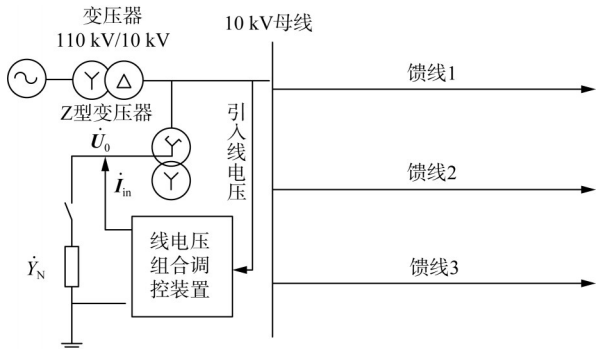


图8 配电网仿真拓扑结构示意图
Fig. 8 Distribution network simulation topology diagram

仿真模型中总共包含 3 条馈线 (1, 2, 3), 馈线仿真参数如表 3 所示。单台注入变压器容量为 20 kVA, 接地变压器容量为 510 kVA。仿真设置两种中性点接地方式: 中性点不接地 ($Y_N = 0$)、中性点经消弧线圈接地 ($Y_N = 1/j\omega L$)。当配电网接地方式切换为经消弧线圈接地方式时, 过补偿度取 5 %, 根据表 3 可知, 则电感 $L=0.851 \text{ H}$, ω 为工频角频率。

表 3 馈线仿真参数		
Tab. 3 Feeder simulation parameters		
馈线	每相对地电容/ μF	每相对地电阻/ $\text{k}\Omega$
1	0.28	380.00
2	2.10	30.00
3	1.40	76.00

4.1 基于线电压组合调控的接地故障消弧仿真结果

设置馈线 3 在 0.1 s 时刻 C 相发生不同过渡电阻单相接地故障及弧光接地故障。在故障相别准确判别后, 0.25 s 投入线电压组合调控装置, 根据选相结果, 调节相应可调注入变档位, 并投入二次侧对应开关, 对故障进行主动降压消弧, 得配电网中性点不同接地方式、不同过渡电阻下故障相电压、电流有效值仿真波形如图 9—12 所示, 不接地方式下弧光接地故障故障相电压、电流波形如图 13—14 所示, 并得线电压组合调控装置投入前后故障相电压、电流有效值情况如表 4 所示。

由图 9—14、表 4 可以看出, 在中性点不接地与经消弧线圈接地方式下发生 10~5 000 Ω 单相接地故障及弧光接地故障时, 通过线电压组合调控

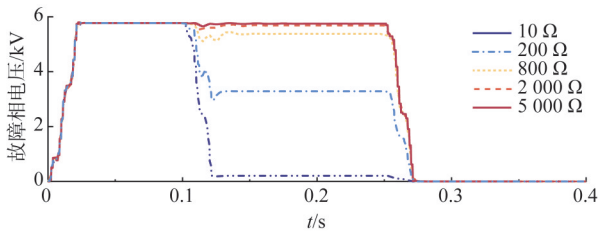


图 9 不同过渡电阻下故障相电压有效值($\nu = 100\%$)

Fig. 9 Effective values of fault phase voltages under different transition resistances ($\nu = 100\%$)

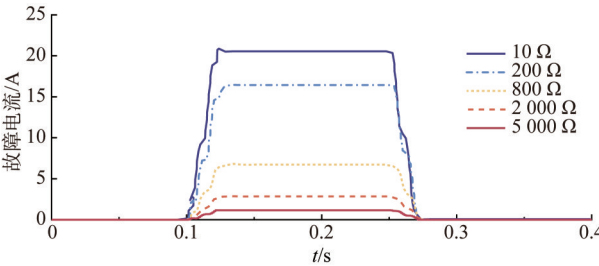


图 10 不同过渡电阻下故障电流有效值($\nu = 100\%$)

Fig. 10 Effective values of fault currents under different transition resistances ($\nu = 100\%$)

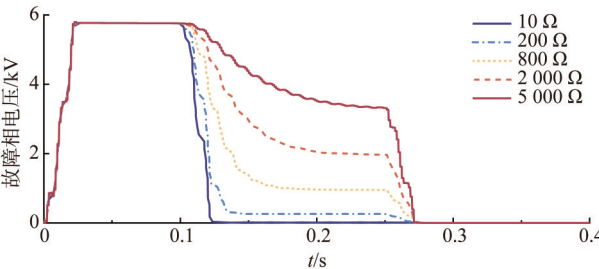


图 11 不同过渡电阻下故障相电压有效值($\nu = -5\%$)

Fig. 11 Effective values of fault phase voltages under different transition resistances ($\nu = -5\%$)

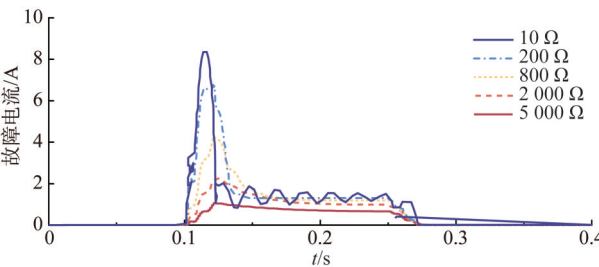


图 12 不同过渡电阻下故障电流有效值($\nu = -5\%$)

Fig. 12 Effective values of fault currents under different transition resistances ($\nu = -5\%$)

装置投入对系统零序电压进行调控后, 均可在一个周波内迅速将故障相电压降低 1 V 以内, 远低于故障电弧重燃电压, 快速有效抑制故障电流至 10 mA 以下, 保证接地故障电弧可靠熄灭, 阻止故障

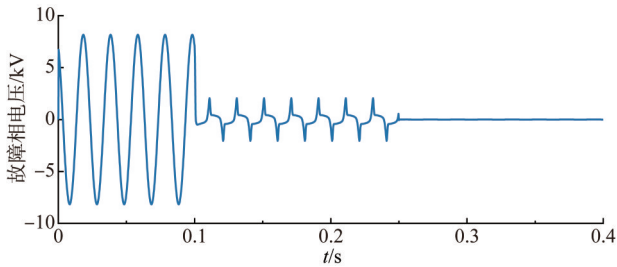


图 13 不接地方式下弧光接地故障故障相电压波形

Fig. 13 Arc grounding fault phase voltages waveform under ungrounded mode

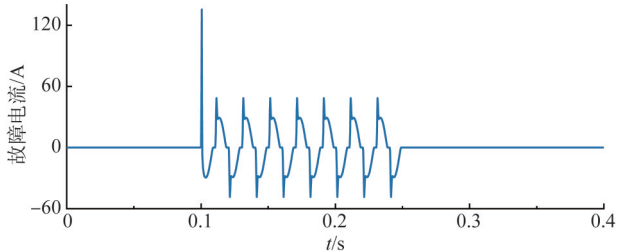


图 14 不接地方式下弧光接地故障故障相电流波形

Fig. 14 Arc grounding fault phase currents waveform in ungrounded mode

表 4 不同接地故障工况下线电压组合调控装置消弧效果

Tab. 4 Arc suppression effect of line voltages combined control device under different grounding fault conditions

中性点接地 方式	过渡电阻/ Ω	故障相电压/V		故障电流/A	
		投入前	投入后	投入前	投入后
不接地	10	205.64	0.62	20.54	0.06
	200	3 287.49	0.62	16.44	0.00
	800	5 378.10	0.62	6.72	0.00
	2 000	5 684.70	0.62	2.84	0.00
	5 000	5 750.90	0.62	1.15	0.00
经消弧线圈接地 ($\nu = -5\%$)	10	13.43	0.11	1.34	0.01
	200	260.81	0.11	1.30	0.00
	800	952.13	0.11	1.19	0.00
	2 000	1 993.46	0.11	1.00	0.00
	5 000	3 421.26	0.11	0.68	0.00

电弧重燃, 具备较强的抗过渡电阻能力和动态性能。

配电网正常至接地故障发生以及线电压组合调控装置投入消弧整个过程的三相线电压变化情况如图 15 所示, 三相线电压在接地故障发生及线电压组合调控装置投入后整个过程, 三相线电压峰值始终稳定在 14.14 kV, 表明系统发生单相接地故障及对其进行调控时均不影响系统三相线电压, 线电压维持不变。由此可知, 线电压组合调控接地故障相

主动降压消弧方法不改变系统线电压,不影响配电网正常运行,可保持配电变压器负荷侧在整个接地故障处置过程中的正常供电。

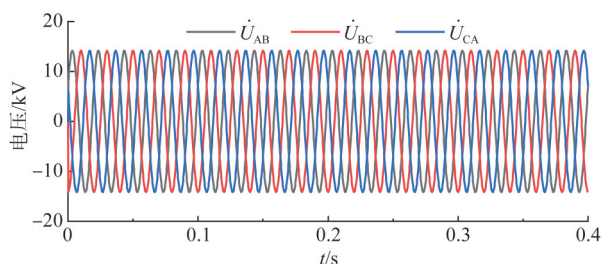


图 15 三相线电压波形

Fig. 15 Three-phase line voltage waveform

4.2 基于线电压组合调控的接地故障类型辨识仿真结果

经线电压组合调控装置进行故障消弧处理后,记录消弧操作下零序电压 $\dot{U}_0'$ 、注入电流 $\dot{I}_m'$,延时 5 s 调节相应可调注入变压器档位,改变其变比,同样记录该时刻下零序电压 $\dot{U}_0''$ 、注入电流 $\dot{I}_m''$ 。

通过对中性点不同接地方式(不接地、经消弧线圈接地)、故障类型及过渡电阻下单相接地故障进行仿真,得中性点不同接地方式、故障类型及过渡电阻故障时线电压组合调控装置换挡前后零序电压 $\dot{U}_0$ 、注入电流 $\dot{I}_m$ 相位仿真数据如表 5 所示,单相接地故障类型辨识仿真结果如表 6 所示。

由表 5—6 可知,在不同接地方式和故障类型

表 5 不同接地故障工况下装置换挡前后 $\theta(\dot{U}_0)$ 与 $\theta(\dot{I}_m)$

Tab. 5 $\theta(\dot{U}_0)$ and $\theta(\dot{I}_m)$ of the device before and after shifting under different ground fault conditions

接地方式	过渡电阻/ Ω	故障类型	$\theta(\dot{U}_0)/(^{\circ})$		$\theta(\dot{I}_m)/(^{\circ})$	
			换挡前	换挡后	换挡前	换挡后
不接地	10	瞬时性	-150.01	-120.00	-62.40	-32.37
		永久性	-150.01	-120.08	-62.40	-1.08
	500	瞬时性	-150.01	-120.00	-62.38	-32.37
		永久性	-150.01	-120.00	-62.38	-20.86
	2 000	瞬时性	-150.01	-120.00	-62.38	-32.37
		永久性	-150.01	-120.00	-62.38	-28.53
经消弧线圈接地	10	瞬时性	-150.00	-120.00	159.78	-170.17
		永久性	-150.00	-120.08	159.78	-0.03
	500	瞬时性	-150.00	-120.00	159.67	-170.34
		永久性	-150.00	-120.00	159.67	-1.25
	2 000	瞬时性	-150.00	-120.00	159.67	-170.34
		永久性	-150.00	-120.00	159.67	-8.12

表 6 不同接地故障工况下单相接地故障类型辨识结果

Tab. 6 Identification results of single-phase ground fault type under different ground fault conditions

接地方式	R_f/Ω	故障类型	$\Delta\theta(\dot{U}_0)/(^{\circ})$	$\Delta\theta(\dot{I}_m)/(^{\circ})$	H_1	辨识结果
不接地	10	瞬时性	29.99	30.03	1.00	正确
		永久性	29.93	61.32	0.03	正确
	500	瞬时性	29.99	30.01	1.00	正确
		永久性	29.99	41.52	0.66	正确
	2 000	瞬时性	29.99	30.01	1.00	正确
		永久性	29.99	33.85	0.89	正确
经消弧线圈接地	10	瞬时性	30.00	30.05	1.00	正确
		永久性	29.92	-159.81	0	正确
	500	瞬时性	30.00	29.99	1.00	正确
		永久性	30.00	-160.92	0.13	正确
	2 000	瞬时性	30.00	29.99	1.00	正确
		永久性	30.00	-167.79	0.84	正确

下经不同过渡电阻发生单相接地故障时,线电压组合调控装置换挡前后,零序电压相位变化量基本维持在 30° ,与理论分析值一致。瞬时性故障下注入电流相位变化量接近 30° ,与零序电压相位变化量基本一致,所测 H_1 值均为 1;而对于永久性接地故障,受过渡电阻影响,注入电流相位变化量不属于 $(30^{\circ} - \gamma, 30^{\circ} + \gamma)$ 区间,且经消弧线圈接地方式下较不接地方式下偏移量更大,特征更明显,另外 H_1 值均小于 1。根据不同故障工况下所得注入电流相位变化量及 H_1 值,运用故障类型相角辨识判据对故障类型的辨识结果如表 6 所示。由表 6 可知,针对各种不同接地故障工况,该单相接地故障类型辨识方法均可准确辨识故障类型,并具备较强的抗过渡电阻能力,验证了该单相接地故障类型辨识方法的可行性。

4.3 基于线电压组合调控的接地故障馈线辨识仿真结果

若经故障类型方法辨识为永久性接地故障,则启动故障选线功能。首先通过获取线电压组合调控装置换挡前后各馈线零序电流相位变化量,再利用故障馈线相角辨识判据对故障馈线进行辨识。

通过对中性点不同接地方式和过渡电阻下永久性单相接地故障进行仿真,得单相接地故障馈线辨识仿真数据及结果如表 7—8 所示。

根据表 7—8 数据可得,在不同接地方式及过渡电阻下发生永久性接地故障时,线电压组合装置

换挡前后非故障馈线零序电流相位变化量基本维持在 30° 且 $H_2=1$, 而故障馈线零序电流相位变化量明显大于非故障馈线零序电流相位变化量 30° 并且 $H_2<1$, 利用该文所提故障馈线辨识判据对各馈线零序电流相角差及 H_2 值进行辨识, 表 8 中馈线辨识结果表明: 在各种不同故障工况下, 该方法均可准确辨识故障馈线及非故障馈线, 此外, 该故障馈线辨识方法几乎不受接地方式影响, 并具备很强的抗过渡电阻能力, 有利于故障馈线的快速隔离与保护。

表 7 不同接地故障工况下换挡前后 $\theta(\dot{U}_0)$ 与 $\theta(\dot{I}_{0\alpha})$

Tab. 7 $\theta(\dot{U}_0)$ and $\theta(3\dot{I}_{0\alpha})$ before and after shifting under different ground fault conditions

接地方式	过渡电阻/ Ω	馈线	$\theta(\dot{U}_0)/(^{\circ})$		$\theta(3\dot{I}_{0\alpha})/(^{\circ})$	
			换挡前	换挡后	换挡前	换挡后
不接地	10	1			-61.98	-0.09
		2	-150.01	-120.08	-62.90	-32.97
		3			-61.72	-31.79
	500	1			-61.73	-3.57
		2	-150.01	-120.00	-62.90	-32.90
		3			-61.72	-31.72
	2 000	1			-61.72	-10.84
		2	-150.01	-120.00	-62.90	-32.90
		3			-61.72	-31.72
经消弧线圈接地	10	1			-61.52	-0.09
		2	-150.00	-120.08	-62.89	-32.97
		3			-61.71	-31.79
	500	1			-61.71	-3.57
		2	-150.00	-120.00	-62.89	-32.89
		3			-61.71	-31.71
	2 000	1			-61.71	-10.84
		2	-150.00	-120.00	-62.89	-32.89
		3			-61.71	-31.71

5 结论

针对现有配电网单相接地故障处置难题, 提出了基于线电压组合调控的配电网单相接地故障消弧与保护方法, 得出以下结论。

1) 提出基于线电压组合调控的配电网单相接地故障主动降压消弧方法, 通过调节可调注入变变比及二次侧开关, 可在一个周波内主动将故障电压将至电弧重燃电压以下, 有效抑制故障残流, 实现单相接地故障快速可靠消弧。

表 8 不同接地故障工况下单相接地故障馈线辨识结果

Tab. 8 Identification results of single-phase grounding fault feeder under different grounding fault conditions

接地方式	R_f/Ω	馈线	$\Delta\theta(\dot{U}_0)/(^{\circ})$	$\Delta\theta(3\dot{I}_{0\alpha})/(^{\circ})$	H_2	辨识结果
不接地	10	1		61.89	0.00	正确
		2	29.93	29.93	1.00	
		3		29.93	1.00	
	500	1		58.16	0.12	正确
		2	29.99	30.00	1.00	
		3		30.00	1.00	
	2 000	1		50.88	0.35	正确
		2	29.99	30.00	1.00	
		3		30.00	1.00	
经消弧线圈接地	10	1		61.43	0.00	正确
		2	29.92	29.92	1.00	
		3		29.92	1.00	
	500	1		58.14	0.12	正确
		2	30.00	30.00	1.00	
		3		30.00	1.00	
	2 000	1		50.87	0.35	正确
		2	30.00	30.00	1.00	
		3		30.00	1.00	

2) 提出基于线电压组合调控的配电网单相接地故障类型及馈线辨识方法, 根据可调注入变换挡前后注入电流相角及导纳比 H_1 变化情况, 准确辨识瞬时性与永久性接地故障; 根据换挡前后馈线零序电流相角及导纳比 H_2 变化情况, 实现永久性接地故障馈线精准辨识, 灵敏度高。

3) 与柔性消弧技术相比, 基于线电压组合调控的主动降压消弧技术成本较低, 控制简单且具有更高的可靠性; 与消弧柜技术相比, 可实现零序电压灵活调控, 灵活性好, 且运行可靠, 便于在配电网中得以推广应用。

参考文献

[1] 李党, 白浩, 霍建彬, 等. 基于零序导纳的小电阻接地系统馈线高阻接地故障保护方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(7): 95-102, 114.
LI Dang, BAI Hao, HUO Jianbin, et al. High-resistance ground fault protection method based on zero-sequence admittance in low-resistance ground systems [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7): 95-102, 114.
[2] 欧阳剑, 白浩, 杨海军, 等. 基于功率因数角双端测量的配电网单相接地故障检测新方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 107-115.

- OUYANG Jian, BAI Hao, YANG Haijun, et al. New method of single-phase grounding fault detection in distribution network based on power factor angle two-terminal measurement [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 107 - 115.
- [3] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 王宾, 崔鑫. 中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3864 - 3872.
- WANG Bin, CUI Xin. Nonlinear modeling and analytical analysis of arc high resistance grounding fault in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3864 - 3872.
- [5] 刘宝稳, 马宏忠, 沈培峰, 等. 新型接地故障基波电流全补偿柔性控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2322 - 2330.
- LIU Baowen, MA Hongzhong, SHEN Peifeng, et al. New flexible control system of full compensation single-phase ground fault fundamental current [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2322 - 2330.
- [6] 霍建彬, 李巍, 周歧林, 等. 基于零序导纳的消弧线圈接地系统馈线单相断线故障保护方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 117 - 124.
- HUO Jianbin, LI Wei, ZHOU Qilin, et al. Feeder single-phase disconnection fault protection method of arc suppression coil grounding system based on zero sequence admittance [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 117 - 124.
- [7] WANG P, CHEN B, TIAN C, et al. A novel neutral electromagnetic hybrid flexible grounding method in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1350 - 1358.
- [8] 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.
- [9] 蔡旭, 刘勇, 胡春强, 等. 新型偏磁式谐振接地与保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 44 - 49.
- CAI Xu, LIU Yong, HU Chunqiang, et al. New resonance earth system with magnetic bias and its protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 44 - 49.
- [10] ELOMBO A I, HOLTZHAUSEN J P, VERMEULEN H J, et al. Comparative evaluation of the leakage current and aging performance of HTV SR insulators of different creepage lengths when energized by AC, DC or DC in a severe marine environment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 421 - 428.
- [11] 裴善鹏, 连鸿波, 李万彬, 等. 快速调匝式消弧线圈及接地选线一体化装置研究[J]. 现代电力, 2006, 23(1): 20 - 24.
- PEI Shanpeng, LIAN Hongbo, LI Wanbin, et al. Research on the incorporate device of quick multi-tap arc-suppression coil and detection of earth fault feeder [J]. Modern Electric Power, 2006, 23(1): 20 - 24.
- [12] 程路, 陈乔夫, 张宇, 等. 变压器负载可控的新型自动调谐消弧线圈[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 50 - 54.
- CHENG Lu, CHEN Qiaofu, ZHANG Yu, et al. Novel automatic tuning arc-suppression coil using transformer with controllable load [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 50 - 54.
- [13] 陆国庆, 刘味果, 杨旭, 等. 应用自动跟踪补偿消弧装置系统中残流稳定时间的探讨[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 57 - 61.
- LU Guoqing, LIU Weiguo, YANG Xu, et al. Discussion on decay time for residual current in the systems using the arc-suppressing coil apparatus with automatic tracking and compensation functions [J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1): 57 - 61.
- [14] 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.
- [15] 靳汪一, 曾祥君, 伍智华, 等. 基于 IGBT 新型消弧线圈自动调谐系统[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(2): 56 - 60.
- JIN Wangyi, ZENG Xiangjun, WU Zhihua, et al. A novel IGBT based arc-suppression coil automatic tuning system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(2): 56 - 60.
- [16] 王宇波, KLAUS Winter. 接地故障中和器全补偿技术及应用[J]. 供用电, 2015, 32(6): 24 - 29.
- WANG Yubo, KLAUS Winter. Earth fault neutralizer full compensation technology and application [J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(6): 24 - 29.
- [17] 李晓波, 王崇林. 零残流消弧线圈综述[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 116 - 121.
- LI Xiaobo, WANG Chonglin. Survey of zero-residual-current arc suppression coil [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 116 - 121.
- [18] 郭谋发, 游建章, 张伟骏, 等. 基于三相级联 H 桥变流器的配电网接地故障分相柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 11 - 22.
- GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Separate-phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three-phase cascaded H-bridge converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 11 - 22.
- [19] 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.
- [20] 陈锐, 陈朵红, 张健, 等. 配电网柔性接地装置电压控制方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 3 - 10.
- CHEN Rui, CHEN Duohong, ZHANG Jian, et al. Research on voltage control method of flexible grounding device in distribution network [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 3 - 10.
- [21] 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.
- [22] 齐郑, 刁春燕, 陈艳波. 配电网快速故障点转移熄弧方法的

- 有效性在线辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 69–75.
- QI Zheng, DIAO Chunyan, CHEN Yanbo. Online identification of the effectiveness of fast fault point transfer arc extinguishing method for distribution networks [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 69–75.
- [23] 曾祥君, 卓超, 喻锐, 等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降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.
- [24] 曾祥君, 李理, 喻锐, 等. 配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧新原理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2953–2966.
- ZENG Xiangjun, LI Li, YU Kun, et al. Novel principle of arc suppression for grounding phase voltage actively reduced based on phase power supply feedback in distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2953–2966.
- [25] 栾晓明, 武守远, 贾春娟, 等. 基于改进零序导纳法的单相接地故障选线原理[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 353–360.
- LUAN Xiaoming, WU Shouyuan, JIA Chunjuan, et al. Fault line selection principle of single-phase-to-ground fault based on improved zero-sequence admittance [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 353–360.
- [26] 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.

收稿日期: 2024-04-04; 网络首发日期: 2024-07-31

作者简介:

许仕杰(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障检测与保护, 1565629659@qq.com;

喻锐(1989), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制, kunyu0707@163.com;

曾祥君(1972), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制, cexjzeng@qq.com。

(上接第 99 页 Continued from Page 99)

- [20] ZHONG J, TAN Y, LI Y, et al. Distributed operation for integrated electricity and heat system with hybrid stochastic/robust optimization [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(128): 106680.
- [21] NOUROLLAHI R, SALYANI P, ZARE K, et al. Resiliency-oriented optimal scheduling of microgrids in the presence of demand response programs using a hybrid stochastic-robust optimization approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(28): 106723.
- [22] BIRGE J R, LOUVEAUX F. Introduction to Stochastic Programming[M]. New York: Springer, 2011: 485.
- [23] RIOS L M, SAHINIDIS N V. Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations[J]. Journal of Global Optimization, 2013, 56(3): 1247–1293.
- [24] 陈志威, 吴毓峰, 潘振宁, 等. 基于图表示学习和特征引导的电力系统运行场景生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9521–9533.
- CHEN Zhiwei, WU Shufeng, PAN Zhenning, et al. A power system operating scenario generation method based on graph representation learning and feature guidance [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9521–9533.
- [25] AUDET C, KOKKOLARAS M. Blackbox and derivative-free optimization: theory, algorithms and applications [J]. Optimization and Engineering, 2016, 17(1): 1–2.
- [26] AUDET C, DIGABEL S L, MONTPLAISIR V R, et al. NOMAD version 4: Nonlinear optimization with the MADS algorithm[DB/OL]. (2021–4–23)[2021–5–4]. <https://arxiv.org/abs/2104.11627>
- [27] LIU Y R, HU Y Q, QIAN H, et al. ZOOpt: a toolbox for derivative-free optimization [J]. Science China (Information Sciences), 2022, 65(10): 207101

收稿日期: 2025-06-18; 网络首发日期: 2025-09-18

作者简介:

李诗阳(1985), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统安全稳定控制及人工智能融合, lisy6@csg.cn;

张建新(1983), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, zhangjx@csg.cn;

付超(1982), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, fuchao@csg.cn。