

引用格式:张智,李富,王国宇,等.基于零序电流注入的配电网故障自愈控制方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):92-100.

Citation: ZHANG Zhi, LI Fu, WANG Guoyu, et al. Fault self-healing control method for distribution network based on zero-sequence current injection [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 92-100.

基于零序电流注入的配电网故障自愈控制方法

张智¹, 李富¹, 王国宇¹, 王坤²

(1. 国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司, 宁夏 吴忠 751100; 2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:为了准确、快速定位配电网地下电缆的故障,及时完成故障隔离和配电网自愈控制,提出一种基于零序电流注入法的配电网故障自愈控制策略。首先,将分布式零序电流载波信号注入电缆网络中,将注入的载波信号沿电缆传输到变电站;随后,在站内对信号进行信号处理,通过载波信号的特征实现配电网快速选线和定位,从而及时隔离故障,实现配电网自愈。所采用的信号发生装置不需要外部电源,该装置可安装在地下电力电缆周围,对地下电缆网络进行改造,既经济又方便。最后,基于MATLAB进行数值仿真,验证所提方法的有效性。

关键词:配电网;电力电缆;自愈控制;信号注入法;零序电流

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.010 **中图分类号:** TM762 **文章编号:** 1673-9140(2025)01-0092-09

Fault self-healing control method for distribution network based on zero-sequence current injection

ZHANG Zhi¹, LI Fu¹, WANG Guoyu¹, WANG Kun²

(1. Wuzhong Power Supply Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Ningxia 751100, China;

2. Guodian Nanrui Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: To accurately and quickly locate the fault of underground cables of the distribution network and realize the fault isolation and the self-healing control of the distribution network, a fault self-healing control strategy for the distribution network based on the zero-sequence current injection method is proposed. First, a distributed zero-sequence current carrier signal is injected into the cable network, and the carrier signal is transmitted to the substation through the cable. At the substation, the signal is processed, and its characteristics are analyzed to quickly identify the faulty line and locate the fault. This enables timely fault isolation, contributing to the self-healing process for the distribution network. The signal injection device does not require an external power supply, making it easy and cost-effective to install around underground power cables and handle cable network faults. Finally, a numerical simulation is performed on MATLAB, validating the effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution network; power cable; self-healing control; signal injection method; zero-sequence current

出于对配电网建设以及城市美观的考虑,电力电缆在城市配电系统中得到了广泛的应用。当电力系统发生故障时,及时隔离或消除故障,实现配电网自愈控制,能够显著提高电网运行的可靠性^[1-9]。配电网自愈控制的关键在于快速故障定位,及时隔离或消除故障,这样就可以减少电网停电时

间。电缆的故障定位一般有阻抗法、声波反射法以及主动信号注入法等。阻抗法通过从配电网地下电缆网络的一端或两端进行故障定位,常利用变电站故障录波数据估计故障阻抗^[10-11];反射法是通过检查电缆线路彻底定位故障的方法,可以通过声音或电磁信号确定故障电缆,采用该方法时需要运维人

收稿日期:2024-03-19;修回日期:2024-05-29

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229WZ220009)

通信作者:张智(1972—),男,高级工程师,主要从事配电网检、建设、规划以及营销方面工作和研究;E-mail: dzsbd123@sina.com

员实地排查^[12-13];针对单相接地故障,主动信号注入法的检测结果较好,但其对其他故障难以实现故障定位^[14-15]。同时,还有学者研究了基于脉冲反射法^[16-19]和基于行波^[20-23]的故障定位方法。文献[24]提出了通过母线电压互感器注入信号的方法,以改进变压器传递函数诊断的测试,文献[25]将该方法推广到了配电网的故障定位中。

针对大量运用电缆的配电网,本文提出通过电流互感器注入分布式零序电流载波信号进行单相接地故障定位的方法,以实现配电网自愈控制。首先,对电力电缆中的分布式零序电流在电流互感器的二次侧使用高频载波信号进行调制;随后,将调制后的信号直接注入配电网各馈线中以供变电站检测;最后,经过信号处理实现故障定位,进行故障的隔离和排除以实现配电网自愈。高频载波信号中包含零序电流的幅值和相角信息,在中性点不直接接地的配电网中,借助消弧线圈,本文方法只需识别零序电流的相角差异实现故障定位;而在中性点直接接地的配电网中,则需要检测和比较各馈线零序电流之间的相位角差^[26]。

1 接地故障时零序电流的分布特征

配电网有 3 种典型网络结构:辐射状、树状以及环型网络结构,如图 1 所示(a_i, b_i 表示馈线, $i=1, 2, 3, 4$)。环形配电网常在开环状态下运行,可等效为辐射状或树状网络。

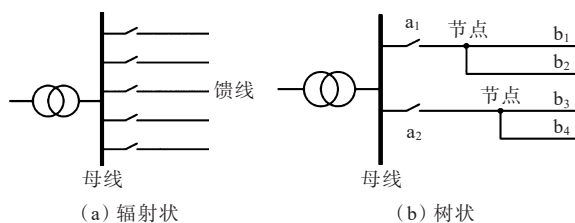


图 1 辐射状、树状网络结构

Figure 1 Radial and tree network structure

1.1 接地故障时零序电流分布特征

配电网正常运行时其中性点电位为零,馈线中没有零序电流;当单相接地故障发生时,馈线中会出现零序电流,其分布取决于故障点的位置。与架空输电线路不同,电缆的接地电容更加平衡,假定电缆的三相对地电容相等, $C_{A0}=C_{B0}=C_{C0}=C_0$ 。故障馈线的三相对地电容为 $C_{A0}^k=C_{B0}^k=C_{C0}^k=C_0^k$, 无故障馈线数为 N , 无故障馈线三相对地电容为 $C_{A0}^k=C_{B0}^k=C_{C0}^k=C_0^k (k=0, 1, \dots, N)$, 可得 $C_{A0} =$

$$C_{A0}^g + \sum_{k=1}^N C_{A0}^k, C_{B0} = C_{B0}^g + \sum_{k=1}^N C_{B0}^k, C_{C0} = C_{C0}^g + \sum_{k=1}^N C_{C0}^k$$

辐射状网络故障时零序电流分布如图 2 所示。

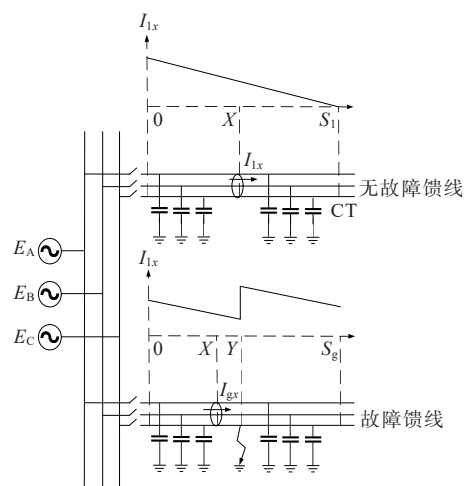


图 2 辐射状网络故障时零序电流分布

Figure 2 Zero-sequence current distribution during radial network failure

线相 C 接地时的故障电流为

$$I_g^* = j\omega C_{A0} U_{AC}^* + j\omega C_{B0} U_{BC}^* = -3j\omega C_0 U_C^* \quad (1)$$

式中, U_{AC}^*, U_{BC}^* 为线电压相量; U_C^* 为相电压。

设第 k 条无故障馈线长度为 S , 则该馈线上离母线距离为 $x (0 \leq x \leq S_k)$ 点处的零序电流为

$$I_{kr}^* = j\omega \frac{(S_k - x) C_0^k}{S_x} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \frac{(S_k - x) C_0^k}{S_x} U_C^* \quad (2)$$

如果故障馈线长度为 S_g , 故障发生点至母线的距离为 $Y (0 \leq Y \leq S_g)$, 则该馈线上离母线距离为 Y 点处的零序电流为

$$I_{gr}^* = -j\omega \frac{x C_0^g}{S_g} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) - j\omega (C_0 - C_0^g) \cdot (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = 3j\omega \left(C_0 - \frac{S_g - x}{S_g} C_0^g \right) U_C^* \quad (3)$$

该馈线上距离母线 x 处 ($Y \leq x \leq S_g$) 即靠负荷侧的零序电流为

$$I_{gr}^* = j\omega \frac{(S_g - x) C_0^g}{S_g} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \left(\frac{S_g - x}{S_g} C_0^g \right) U_C^* \quad (4)$$

根据式(2)~(4), 由图 2 可以看出, 故障点前近母线侧馈线上的零序电流几乎等于接地故障电流的零序电流, 因此故障点前故障馈线的零序电流值最高。故障馈线中零序电流随着距离故障点的距

离(故障点之前)的增加而线性减小。相比之下,故障点后馈线上的零序电流和非故障馈线中的零序电流要低得多。此外,故障点前故障馈线零序电流的相位角与故障点后其零序电流和非故障馈线中零序电流的相位角相反。

1.2 树状网络的零序电流分布

假设图 1(b)中各分支馈线 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 长度分别为 S_{a_1} 、 S_{a_2} 、 S_{b_1} 、 S_{b_2} 、 S_{b_3} 、 S_{b_4} ;各支线对地电容分别为 $C_0^{a_1}$ 、 $C_0^{a_2}$ 、 $C_0^{b_1}$ 、 $C_0^{b_2}$ 、 $C_0^{b_3}$ 、 $C_0^{b_4}$,则 a_1 、 b_1 、 b_2 和 a_2 、 b_2 、 b_3 可以分别等效为 1 条馈线,由此可以将系统简化为具有 2 条馈线的辐射状配电网。本文讨论 a_1 发生单相接地故障时馈线中的零序电流分布情况(b_1 发生故障时也可以用同样的方法推导出来),零序电流沿馈线的分布如图 3 所示。

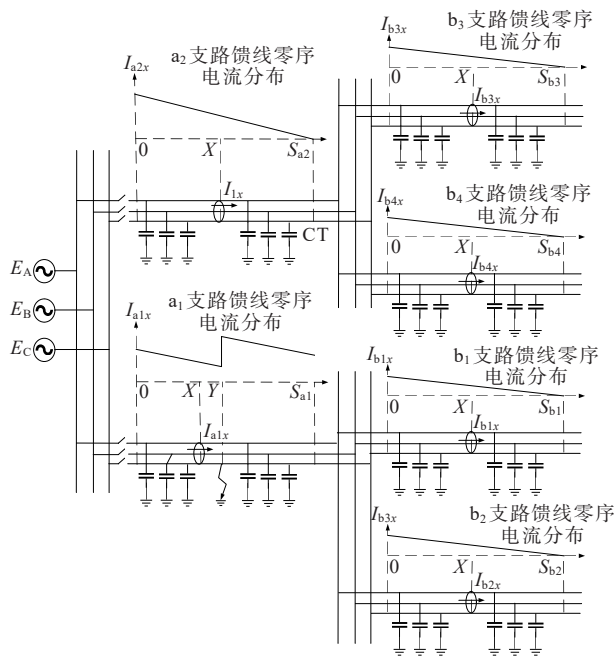


图 3 树状网络故障时零序电流分布

Figure 3 Zero-sequence current distribution during tree network failure

图 3 中,有分支与无分支的馈线零序电流分布相似,馈线故障点近母线侧零序电流的相位角和馈线故障点近负荷侧零序电流的相位角相反。例如,图 1(b)中若分支 b_1 (或 b_2 或 b_3 或 b_4) 发生接地故障,则故障分支可分为馈线段和用户段。馈线段:自故障点起从馈线到母线端;用户段:自故障点经馈线到用户。馈线段零序电流的相角相同,然而,馈线段中零序电流的相位角与其他非故障分支或有故障分支的用户段中零序电流的相位角相反。当发生单相接地故障时,故障馈线的故障零序电流分布特征可作为故障定位的标准。

当 a_1 支路的 C 相出现接地故障时,远离母线侧 b_2 的零序电流为

$$I_{a_2,x}^* = j\omega \frac{(S_{a_2} - x)C_0^{a_2}}{S_{a_2}} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) + j\omega (C_0^{b_2} - C_0^{b_1})(U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \left(\frac{S_{a_2} - x}{S_{a_2}} C_0^{a_2} + C_0^{b_2} + C_0^{b_1} \right) U_C^* \quad (5)$$

式中, $0 \leq x \leq S_{a_2}$ 。

距离支路节点且靠近母线侧 x 处馈线 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 的零序电流分别为

$$I_{b_1,x}^* = j\omega \frac{(S_{b_1} - x)C_0^{b_1}}{S_{b_1}} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \left(\frac{S_{b_1} - x}{S_{b_1}} C_0^{b_1} \right) U_C^* \quad (6)$$

$$I_{b_2,x}^* = j\omega \frac{(S_{b_2} - x)C_0^{b_2}}{S_{b_2}} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \left(\frac{S_{b_2} - x}{S_{b_2}} C_0^{b_2} \right) U_C^* \quad (7)$$

$$I_{b_3,x}^* = j\omega \frac{(S_{b_3} - x)C_0^{b_3}}{S_{b_3}} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \left(\frac{S_{b_3} - x}{S_{b_3}} C_0^{b_3} \right) U_C^* \quad (8)$$

$$I_{b_4,x}^* = j\omega \frac{(S_{b_4} - x)C_0^{b_4}}{S_{b_4}} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \left(\frac{S_{b_4} - x}{S_{b_4}} C_0^{b_4} \right) U_C^* \quad (9)$$

其中, $0 \leq x \leq S_{b_1}$, $0 \leq x \leq S_{b_2}$, $0 \leq x \leq S_{b_3}$, $0 \leq x \leq S_{b_4}$ 。

故障点靠母线侧距离母线 x 处 a_1 中的零序电流为

$$I_{a_1,x}^* = -j\omega (C_0^{a_2} + C_0^{b_1} + C_0^{b_2} + C_0^{b_3} + C_0^{b_4}) \cdot (U_{AC}^* + U_{BC}^*) - j\omega \frac{x C_0^{a_1}}{S_{a_1}} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) = 3j\omega \left(C_0^{a_2} + C_0^{b_1} + C_0^{b_2} + C_0^{b_3} + C_0^{b_4} + \frac{x}{S_{a_1}} C_0^{a_1} \right) U_C^* \quad (10)$$

式中, $0 \leq x \leq Y$ 。

故障点靠用户侧端 x 处 a_1 上的零序电流为

$$I_{a_1,x}^* = j\omega \frac{(S_{a_1} - x)}{S_{a_1}} (U_{AC}^* + U_{BC}^*) + j\omega (C_0^{b_1} + C_0^{b_2})(U_{AC}^* + U_{BC}^*) = -3j\omega \left(\frac{S_{a_1} - x}{S_{a_1}} C_0^{a_1} + C_0^{b_1} + C_0^{b_2} \right) U_C^* \quad (11)$$

式中, $Y \leq x \leq S_{a_1}$ 。

2 配电网自愈控制策略

2.1 在线零序电流信号注入方案

电流互感器在三相地下电缆上的安装及其配

置如图 4 所示,其中图 4(a)为改造后可注入信号的电流互感器的配置。设图 4(a)中电流互感器一次侧绕组匝数为 $N_1 = 1$;次级绕组匝数为 N_2 ,匝数比 $n = N_1/N_2$ 。根据安培定律,电流互感器一二次侧绕组上的电流分别为

$$\begin{cases} i_a = N_2 i_{2a} \\ i_b = N_2 i_{2b} \\ i_c = N_2 i_{2c} \end{cases} \quad (12)$$

$$i_{20} = i_{2a} + i_{2b} + i_{2c} = 3ni_0 \quad (13)$$

$$U_R = Ri_{20} = 3nRi_0 \quad (14)$$

式中, i_0 为馈线中的零序电流; R 为电流互感器的负载电阻, R 上的电压与馈线中的零序电流成正比。

以图 4(b)所示的三相地下电缆为例,可以得出同样的结论。图 4 中可注入信号的电流互感器等效电路如图 5 所示,其中 $L_{\sigma 1}$ 、 $L'_{\sigma 2}$ 为互感器的等效漏电感, R_1 、 R'_2 为互感器的等效绕组电阻, L_m 为互感器的励磁电感。为了简化计算且不影响结果的正确性,本文分析过程中忽略了电流互感器的等效漏电感、绕组电阻和励磁电感。

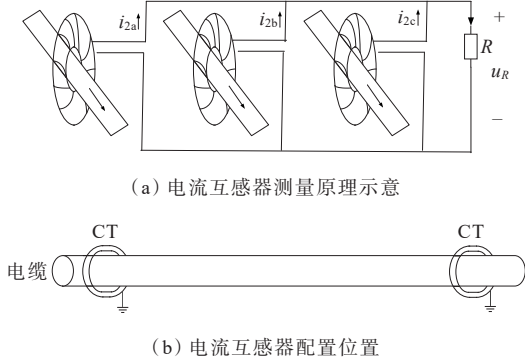


图 4 电流互感器在馈线上的配置和安装示意

Figure 4 Configuration and installation of current transformer on feeder lines

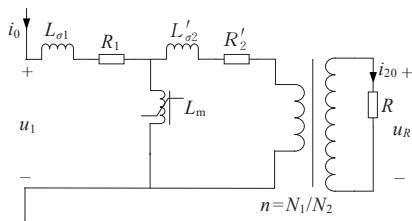


图 5 电流互感器的等效电路

Figure 5 Equivalent circuit of current transformer

图 5 中将一个小的可变电阻与电流互感器的馈线导体串联以实现信号的注入,这种可变负载的电阻反映到电流互感器一次侧,可以作为一个小且可变的串联阻抗,实现馈线零序电流的调制。信号注入装置原理如图 6 所示,通过对金属氧化物半导体

场效应管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) T_1 、 T_2 栅极施加高频控制信号 $P_t(t)$, 控制由 T_1 、 T_2 和二极管 D_1 、 D_2 组成的双向高频电子开关。若 T_1 、 T_2 导通,则 R 短路,若 T_1 、 T_2 关断,则 R 上的电流信号可反馈到 CT 一次侧,由此得到等效变负荷电阻。当调制频率为 300 Hz 时,调制信号 $u_R(t) = 5 \cos(\omega t)$ 调制前、后的电压信号波形如图 7 所示。

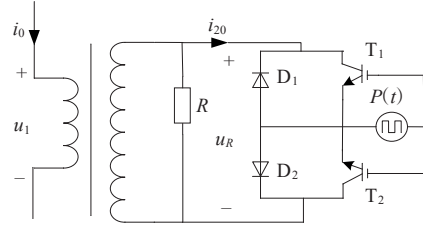


图 6 信号注入装置原理示意

Figure 6 Principle of signal injection device

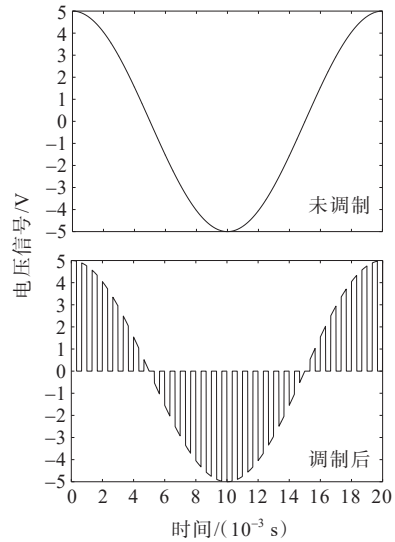


图 7 调制信号波形

Figure 7 Modulated signal waveform

利用 MATLAB/SIMULINK 进行数值仿真,验证所提注入零序电流的电流互感器工作原理。电流互感器注入零序电流的仿真结果如图 8 所示,波形 1、2 分别为馈线中的零序电流和电流互感器的二次电流,波形 3 是负载电阻 R 上的调制电压,其中包含馈线中零序电流的信息,波形 4 是电流互感器一次侧的电压加上电流互感器阻抗上一次侧交流电流的压降,与 R 上的电压相比略有畸变。为了对配电网中的故障点或故障区段进行定位,每个改装的电流互感器均需设定不同的调制频率,以识别特定地点上的零序电流。改造后电流互感器及其分配调制频率 (kHz) 布置方案如图 9 所示。

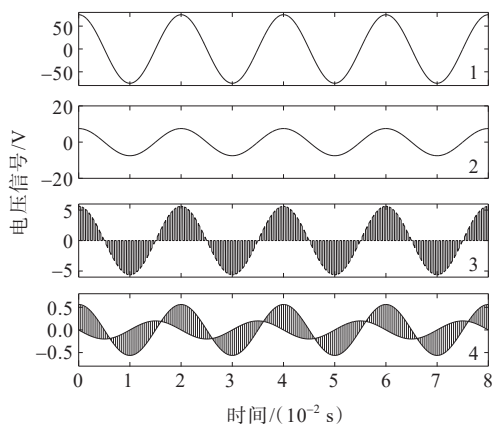


图8 电流互感器仿真实验结果

Figure 8 Simulation experiment results of current transformer

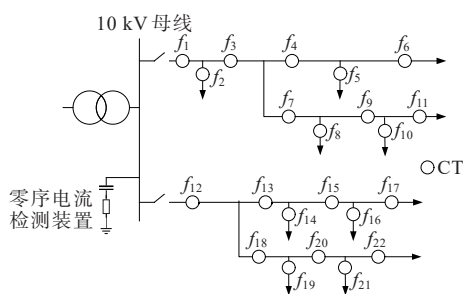


图9 电流互感器布置方案

Figure 9 Current transformer layout plan

当电网正常运行时,馈线中没有零序电流,因此,每个电流互感器都不会向馈线产生调制的零序电流载波信号;若发生线路接地故障,则在馈线中出现零序电流信号;调制后特定频率的零序电流载波信号将注入馈线,并传播到变电站母线。一旦变电站检测到特定载波频率,如 $f_2=8$ kHz(图9),可以得出,安装载波频率为8 kHz的电流互感器所在馈线中存在零序电流,从而确定故障发生的位置。

2.2 调制载波信号的分析与检测

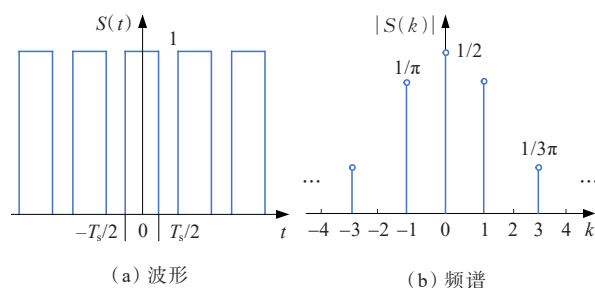
图6中负载电阻电压的调制可以用开关函数 $S(t)$ 乘以负载电阻电压来表示。将 $S(t)$ 定义为

$$S(t) = \begin{cases} 1, & \text{导通} \\ 0, & \text{关断} \end{cases}$$

设 $S(t)$ 表示占空比为50%的单位幅值周期方波序列,则负载电阻 R 上的调制电压可表示为 $u_R^*(t) = u_R(t) \cdot S(t)$,其中 $u_R(t)$ 为未调制电压。开关函数 $S(t)$ 波形和频谱如图10所示。

$$S(t) = \begin{cases} 1, & (nT_s - T_s/4) \leq t \leq (nT_s + T_s/4) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中, t 为 $S(t)$ 的周期。

图10 开关函数 $S(t)$ 波形和频谱Figure 10 Waveform and spectrum of switching function $S(t)$

$S(t)$ 的傅里叶表达式为

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S(k) \exp(jk\omega_s t) \quad (16)$$

其中,

$$S(k) = \frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} S(t) \exp(-jk\omega_s t) dt, \quad k=0, \pm 1, \dots \quad (17)$$

$S(k)$ 的频谱可表示为

$$S(k) = \begin{cases} 1/2, & k=0 \\ \frac{1}{k\pi} (-1)^{\lfloor \frac{k-1}{2} \rfloor}, & k=\pm 1, \pm 3, \dots \\ 0, & k=\pm 2, \pm 4, \dots \end{cases} \quad (18)$$

$u_R(t)$ 采用傅里叶级数形式表示为

$$u_R(t) = [RI_{20m} \exp(-j\omega_1 t) + RI_{20m} \exp(j\omega_1 t)] / 2 \quad (19)$$

在馈线上传输的一组高频零序电流载波信号需要通过各种滤波算法进行提取和处理,以识别每个不同频率的信号。常用的是Butterworth滤波器,其3阶传递函数为

$$H(s) = s^3 (\omega_2 - \omega_1)^3 / [(s^2 + \omega_1 \omega_2)^3 + 2s(\omega_2 - \omega_1)(s^2 + \omega_1 \omega_2)^2 + 2s^2(\omega_2 - \omega_1)(s^2 + \omega_1 \omega_2) + \omega_2^3] \quad (20)$$

式中, ω_2 、 ω_1 分别为上、下截止频率; s 为拉普拉斯变换域中的频率。

经Butterworth滤波器滤波后的零序电流载波信号可写成:

$$S(t) = \frac{RI_{20m} \gamma}{2\pi^2 N_2} \cos(n_p \omega_1 t) \cos(\omega_1 t) \quad (21)$$

式中, γ 为信号传输路径的衰减系数; $n_p = f_s / f$, f_s 为各测量点载波频率。

经过滤波和分离处理后的调制信号如图11所示,信号1表示电流互感器一次侧电流信号,信号2~5分别表示载波频率为5、10、15、20 kHz的载波调制信号,可以看出,通过Butterworth滤波器可以提取每个电流互感器载波信号的频率、幅值和相角信息。为了更好地完成反相角识别,进行信号的非对称调制,对所有调制信号的负半周期采用更高的

调制频率。如图 12 所示,高调制频率的负半周期将在后续被滤除,由此区分 2 个载波信号之间的相反相位角。

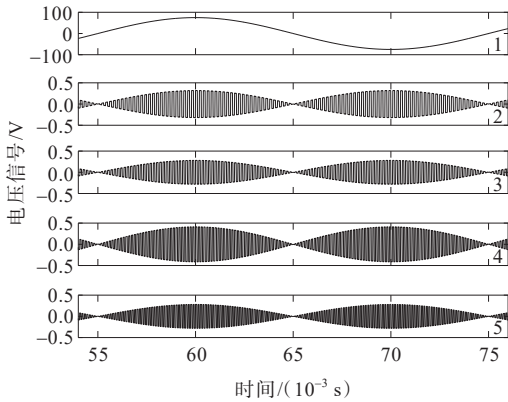


图 11 不同载波频率的载波调制信号
Figure 11 Carrier modulation signals with different carrier frequencies

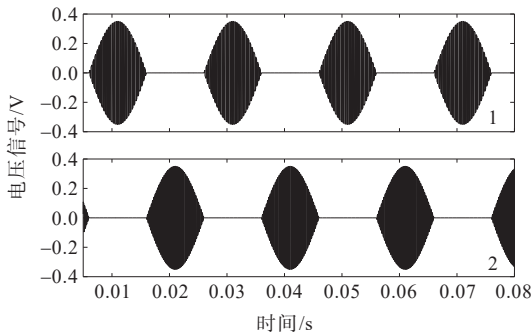


图 12 不对称调制后的载波信号
Figure 12 Carrier signal after asymmetric modulation

2.3 自愈控制策略

在文 2.1 故障定位的基础上,本文提出基于信号注入法的配电网自愈控制方法流程如图 13 所示。

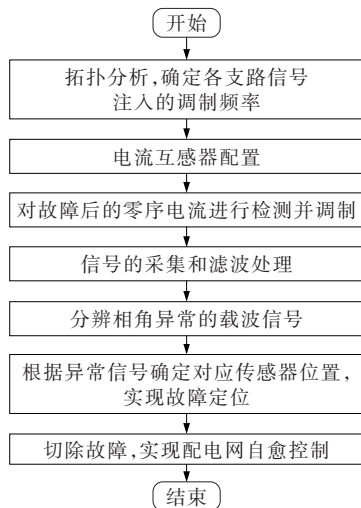


图 13 自愈控制方法流程
Figure 13 Flow chart of self-healing control method

具体步骤如下:

- 1) 对电网进行拓扑分析,确定各支路信号注入的调制频率并完成电流互感器配置;
- 2) 故障发生时对电网内的零序电流进行调制;
- 3) 各支路零序电流信号经电网传输至变电站,由变电站进行信号的采集和滤波处理;
- 4) 根据信号的频率和相角,完成故障定位;
- 5) 排除或隔离故障,确保电网稳定运行。

3 仿真实验

3.1 辐射状馈电结构配电网仿真实验

辐射状馈线结构配电网仿真电路如图 14 所示,设置馈线总长 $l=53$ km,单相接地故障电流 $I_g=80.0$ A, $f_1=25$ 、 $f_2=20$ 、 $f_3=15$ 、 $f_4=10$ 、 $f_5=5$ kHz;设接地故障 1 发生在距离 10 kV 母线 5 km 处,位于 2 个载频 $f_3=15$ 、 $f_4=10$ kHz 的电流互感器之间,仿真结果如图 15 所示,信号 1~5 分别表示载波频率为 25、20、15、10、5 kHz 的载波信号,可以看出,频率为 25、20、15 kHz 载波信号的相角与频率为 10、5 kHz 调制信号的相角相反,即故障点位于预设安装位置的注入频率为 15、10 kHz 载波信号的电流互感器之间。

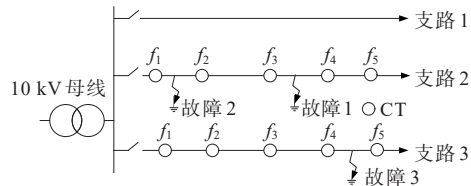


图 14 辐射状结构配电网仿真电路
Figure 14 Simulation circuit of radial structure distribution network

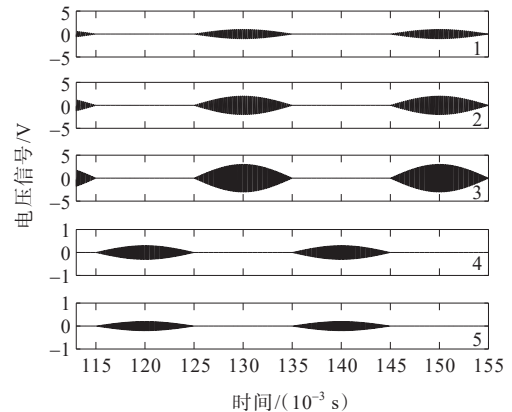
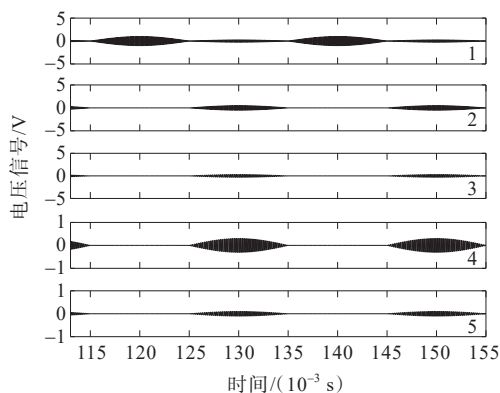
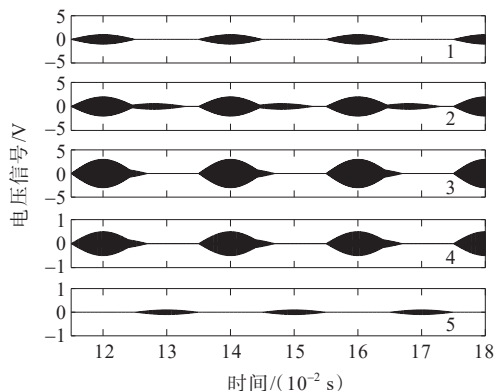


图 15 故障 1 不同频率载波信号仿真实验结果
Figure 15 Simulation experiment results of carrier signals with different frequencies for fault 1

设接地故障 2 发生于载波频率为 25、20 kHz 的电流互感器之间,接地故障 3 发生于载波频率为 10、5 kHz 的电流互感器之间。接地故障 2、3 情况下载波信号的仿真实验结果如图 16 所示(载波信号 1~5 表示同图 15),从检测和滤波的载波信号中可以很容易地定位接地故障点和区段。



(a) 接地故障 2



(b) 接地故障 3

图 16 不同载波频率的载波信号仿真实验结果

Figure 16 Simulation experiment results of carrier signals with different carrier frequencies

3.2 树状馈线配电网仿真实验

设置接地故障 4 发生在载波频率为 10、5 kHz 的电流互感器之间的支路上,接地故障 5 发生在载波频率为 20、15 kHz 的电流互感器之间的支路上,接地故障 6 发生在载波频率为 25、20 kHz 的电流互感器之间的支路上,仿真电路如图 17 所示, $f_1=25$ 、 $f_2=20$ 、 $f_3=15$ 、 $f_4=10$ 、 $f_5=5$ kHz。

仿真结果如图 18 所示(载波信号 1~5 表示同图 15)。可以发现,图 18(a)中信号 1、4 的相角与其他信号相反;信号 2、3、5 幅值非常小,由此,可以确定故障位于频率 10、5 kHz 的电流互感器之间,从而切除故障;从图 18(b)、(c)中也可以很明显地分辨出相角、幅值具有明显差异的载波信号,从而确定故障位置,进行故障的切除或隔离。

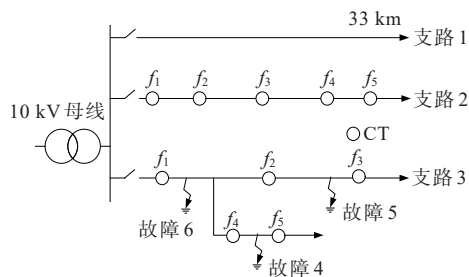
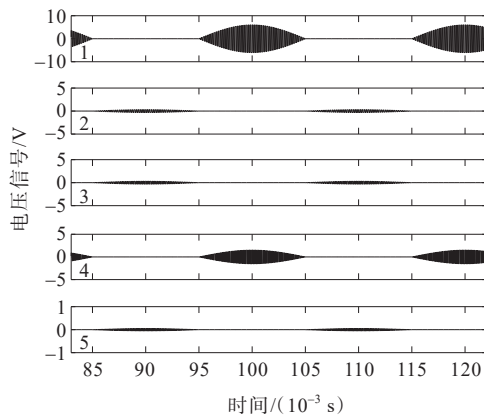
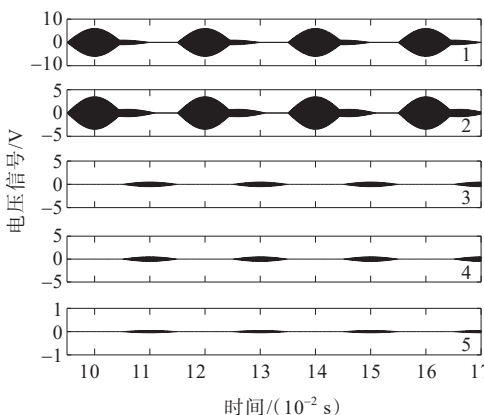


图 17 故障 4 仿真电路

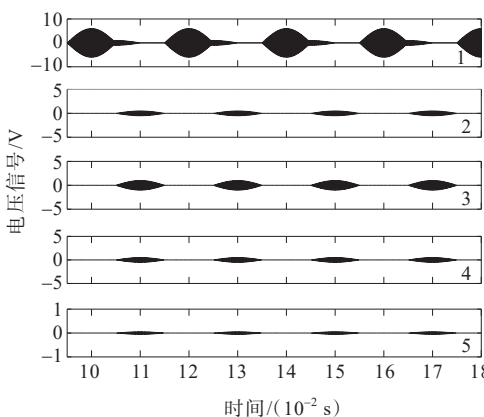
Figure 17 Simulation circuit of fault 4



(a) 故障 4



(b) 故障 5



(c) 故障 6

图 18 故障 4~6 仿真实验结果

Figure 18 Simulation results of faults 4 - 6

4 结语

本文提出了一种基于注入信号法的配电网自愈控制策略。通过与电流互感器负载电阻并联的电子开关的通断产生零序电流载波信号;高频调制载波信号包含了电流互感器所在位置的零序电流信息。将零序电流载波信号注入电网中,由电网传输到变电站母线,经滤波器处理后得到分布式零序电流的信息,不同频率的载波信号对应了不同位置的零序电流传感器,通过分辨存在相位差异的零序电流,可以确定对应位置的传感器,从而实现故障定位,最终完成故障切除或隔离。该方法不需要其他通信工具,大幅提升了故障定位的可行性。

下一步研究将考虑不同故障情况下自愈控制方法的可行性,并依据电网的实际运行进行更详细的仿真实验。

参考文献:

- [1] 李铁成,张卫明,臧谦,等.基于混合整数线性规划的配电网在线自愈方案[J].中国电力,2023,56(5):129-136.
LI Tiecheng,ZHANG Weiming,ZANG Qian,et al.Online self-healing scheme of distribution network based on mixed integer linear programming[J]. Electric Power, 2023,56(5):129-136.
- [2] 杨福,臧璇,瞿寒冰,等.基于配电自动化的配网单相接地故障定位与自愈[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):176-180.
YANG Fu,ZANG Xuan,ZHAI Hanbin,et al.Location and self-healing of single-phase grounding fault based on distribution automation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(4):176-180.
- [3] 张丽虹,常成,熊炜,等.基于智能控制终端的主动配电网故障处理方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):22-29.
ZHANG Lihong, CHANG Cheng, XIONG Wei, et al. Research on fault processing of active power distribution network based on intelligent control terminal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 22-29.
- [4] 李文君,段登伟,朱雨,等.基于5G通信模式下的配电网自愈保护应用[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):152-159.
LI Wenjun, DUAN Dengwei, ZHU Yu, et al. Application of distribution network protection based on a 5G end-to-end communication mode[J]. Power System Protection and Control,2022,50(24):152-159.
- [5] 秦立军,张国彦,陈晓东,等.含DG的智能配电网快速自愈技术研究[J].电测与仪表,2021,58(7):67-73.
QIN Lijun, ZHANG Guoyan, CHEN Xiaodong, et al. Research on rapid self-healing technology of smart distribution network with DG[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(7):67-73.
- [6] 娄为,沈冰,裘愉涛,等.钻石型配电网的保护与自愈策略分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):161-168.
LOU Wei, SHEN Bing, QIU Yutao, et al. Protection and self-healing strategy analysis of a diamond type distribution network[J]. Power System Protection and Control,2022,50(23):161-168.
- [7] 蔡田田,姚浩,杨英杰,等.基于云-边协同的配电网快速供电恢复智能决策方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(19):94-103.
CAI Tiantian, YAO Hao, YANG Yingjie, et al. Cloud-edge collaboration-based supply restoration intelligent decision-making method[J]. Power System Protection and Control,2023,51(19):94-103.
- [8] 李英量,白博旭,朱琦,等.基于电动汽车充电站的不平衡配电网自愈及优化运行[J].电力建设,2024,45(6):37-46.
LI Yingliang, BAI Boxu, ZHU Qi, et al. Self-healing and optimal operation of unbalanced distribution network based on electric vehicle charging station[J]. Electric Power Construction,2024,45(6):37-46.
- [9] 杜晓东,王立斌,刘科研,等.基于随机森林的配电网故障分布特征预测方法[J].电网与清洁能源,2023,39(1):70-77.
DU Xiaodong, WANG Libin, LIU Keyan, et al. A prediction method of distribution network fault distribution characteristics based on random forest[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 70-77.
- [10] 杨超,郭文奇,熊姚意,等.基于改进阻抗法的配电变压器低压故障越级跳闸故障定位方法[J].电气自动化,2023,45(3):11-14.
YANG Chao, GUO Wenqi, XIONG Yao Yi, et al. Fault location method for low voltage fault overstep trip of distribution transformer based on improved impedance method[J]. Electrical Automation,2023,45(3):11-14.
- [11] 彭雨舟,林有浩,邓炎,等.基于一二次融合设备的配电网含分支线路参数计算方法[J].智慧电力,2024,52(6):84-91+122.
PENG Yuzhou, LIN Youhao, DENG Yan, et al. Parameters calculation method of distribution network branch lines based on primary-secondary integration equipment[J]. Smart Power,2024,52(6):84-91+122.
- [12] 王建华,贺瑞斌.声磁同步电缆故障定位中背景噪声抑制技术[J].电工技术,2022(20):109-111.
WANG Jianhua, HE Ruibin. Background noise suppression technology in cable fault location of acoustic-magnetic synchronous method[J]. Electric Engineering,2022 (20):109-111.

- [13] 王志武,涂画,李力行,等.基于时频域反射法的核电站仪控电缆缺陷检测[J].电力工程技术,2023,42(5):240-249.
WANG Zhiwu,TU Hua,LI Lixing,et al.Defect detection of I&C cable in NPP based on TFDR[J].Electric Power Engineering Technology,2023,42(5):240-249.
- [14] 杜刚,刘迅,苏高峰.基于FTU和“S”信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(12):73-76.
DU Gang,LIU Xun,SU Gaofeng.Research on technology of grounding fault location combining FTU and “S” signal injecting method in distribution grid[J]. Power System Protection and Control,2010,38(12):73-76.
- [15] 吴任博,黄奕俊.高比例可再生能源接入下自愈性能力的分布式配电网重构策略研究[J].发电技术,2024,45(5):975-982.
WU Renbo, HUANG Yijun. Research on reconfiguration strategy of distributed distribution network with self-healing performance under high-proportion renewable energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(5):975-982.
- [16] 王昱皓,周凯,汪先进,等.基于改进时频域反射法的电力电缆局部缺陷定位[J].中国电机工程学报,2021,41(7):2584-2594.
WANG Yuhao, ZHOU Kai, WANG Jinjin, et al. Power cable defects location based on improved time-frequency domain reflectometry[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7):2584-2594.
- [17] 赵书静,龚梁涛,詹博博,等.基于FMCW的10 kV配电网电缆故障定位及类型识别方法[J].中国电机工程学报,2023,43(11):4452-4463.
ZHAO Shujing, GONG Liangtao, ZHAN Bobo, et al. 10 kV cable fault location and type identification method based on FMCW cross-correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11):4452-4463.
- [18] 梁栋,徐丙垠,谢伟,等.基于小波脉冲相关的电缆故障时域反射测距方法[J].中国电机工程学报,2020,40(24):8050-8057+8241.
LIANG Dong, XU Bingyin, XIE Wei, et al. A time-domain-reflectometry cable fault location method using wavelet pulses and cross-correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24):8050-8057+8241.
- [19] 陈允,崔博源,赵仁勇,等.断路器绝缘拉杆缺陷的超声检测方法研究[J].高压电器,2023,59(7):193-199.
CHEN Yun, CUI Boyuan, ZHAO Renyong, et al. Study on ultrasonic detection method for insulation rod defects in circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7):193-199.
- [20] 姜雨轩,窦震海,陈平,等.基于行波时差矩阵算法的10 kV电缆网络故障定位[J].水电能源科学,2020,38(7):184-188.
JIANG Yuxuan, DOU Zhenhai, CHEN Ping, et al. Fault location of 10 kV cable network based on traveling wave time difference matrix algorithm[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7):184-188.
- [21] NAIDU O, PRADHAN A K. A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 2019, 34(2):505-513.
- [22] 孙文成,李健,彭宇辉,等.基于样本不均衡和特征优选多源融合的输电线路故障类型辨识[J].电测与仪表,2024,61(12):79-89.
SUN Wencheng, LI Jian, PENG Yuhui, et al. Transmission line fault type identification based on the sample imbalance and feature preferred multi-source fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12):79-89.
- [23] 王凯亮,曾远方,李家淇,等.基于希尔伯特-黄变换的新型配电系统行波故障定位仿真研究[J].供用电,2023,40(9):43-49.
WANG Kailiang, ZENG Yuanfang, LI Jiaqi, et al. Simulation study on traveling wave fault location of new distribution network system based on Hilbert-Huang transform[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9):43-49.
- [24] HAMIDI R J, LIVANI H. Traveling wave-based fault location algorithm for hybrid multi-terminal circuits[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 2017, 32(1):135-144.
- [25] RYBEL T D, SINGH A, PAK P, et al. Online signal injection through a bus-referenced current transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1):27-34.
- [26] PENG W, HONG Z, CHEN B, et al. Fault location method in resonant grounded networks based on distributed modulation and compensation adjustment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5):1938-1947.