主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障选线中的应用

朱 珂1.王怡轩2.倪 建3

(1.山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室,山东 济南 250061;2.国网济南供电公司,山东 济南 250012;3.国网潍坊供电公司,山东 潍坊 261021)

摘要:针对中性点经消弧线圈接地系统提出一种无需额外信号注入装置的故障选线方法:当馈线发生单相接 地故障时,通过控制消弧线圈所连接的电力电子开关短时投切阻尼电阻,从而产生频率成分丰富的扰动电流 信号,通过在各出线中对扰动电流信号进行检测和分析实现故障选线。所提方法不需要额外的信号发生装置,对于高阻接地故障同样适用。理论分析、仿真分析和模拟实验都验证了该方法的有效性。

关键词: 接地系统; 消弧线圈; 主动干扰; 故障选线; 阻尼电阻 中图分类号: TM 77 文献标识码: A D

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.029

0 引言

近年来随着国内配网规模逐渐扩大以及电缆线路的广泛应用,线路对地电容电流不断增加,中性点经消弧线圈接地方式因能够迅速熄灭单相接地故障点的电弧而逐渐成为国内中压配网中性点运行方式的主流。

消弧线圈的广泛应用在提高了配网供电可靠性的同时,也给单相接地故障选线带来了困难。针对配网的故障选线问题,国内外学者提出了多种解决方案,主要可以分为被动法和主动法。被动法主要根据故障电流自身的相关特点进行选线,包括零序电流幅值比较法^[12]、零序电流方向法^[3]及相关方法^[4]、零序功率法^[5-6]、零序导纳法^[7-9]等利用零序分量的选线方法,以及负序电流法^[10]、谐波法、首半波法^[11]等暂态信号选线方法等。文献[12-16]将小波分析、人工智能等基于新型 DSP 技术的方法与被动法结合进行选线。被动法仅依据故障自身产生的变化,主要是故障电流进行选线,而在谐振接地系统中,这类故障特征十分不明显,因此存在一定局限。

主动法不依赖于故障电流。最早的主动法是 S 注入法^[17-18]及其改进方法^[19]:文献[20-21]通过注入 恒定幅值和特殊频率的电流信号测量阻尼率,选出 故障线路;文献[22-23]分别在中性点和母线电压互 感器二次侧注入信号实现选线。中电阻法^[24-25]将一 中电阻与消弧线圈并联,发生故障时中性点通过中 电阻接地以短时增大对地电流,便于选线,文献[26] 的方法也与之类似。主动法需要额外增加信号注入 设备,信号频率单一,中电阻法还存在增加系统绝缘 压力的问题。

本文针对中性点经消弧线圈接地系统提出了一

收稿日期:2016-09-10;修回日期:2017-08-26

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2013EEM026) Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2013EEM026) 种单相接地故障选线方法。该方法利用消弧线圈中 自带的用于快速投切阻尼电阻的电力电子开关主动 产生扰动电流信号注入系统以用于选线。相比已有 的主动法,本文方法利用了消弧线圈自身的阻尼电 阻,无需附加额外的信号注入设备,产生的选线信号 频率成分丰富,不会增加系统的绝缘压力,而且具备 高阻接地状态下的故障选线能力。

1 利用阻尼电阻投切开关的故障选线原理

1.1 选线方案介绍

在谐振接地系统正常运行时,预调式消弧线圈 通过并联或串联1个阻尼电阻以抑制谐振导致的中 性点位移电压升高。近年来,电力电子开关(如晶闸 管)逐渐被用于发生单相接地故障后快速切除(或旁 路)该阻尼电阻以实现感性电流对容性故障电流的 有效补偿。阻尼电阻的取值如式(1)所示^[27]。

$$U_0 = \frac{K_c U_{\varphi}}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad \varphi = \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$$
(1)

其中, U_0 为中性点位移电压; U_{φ} 为系统相电压; K_e 为系统不对称度;v为电网脱谐度。对于确定的系统, U_{φ} 、 K_e 、v均为定值; U_0 小于系统相电压的 15%,因此系统阻尼率 d就可以确定,确定阻尼率后就可以得到阻尼电阻的值。

本文利用消弧线圈中自带的电力电子开关,提出了一种主动故障选线方法,以消弧线圈串联阻尼电阻为例,具体实施方案如图1所示。图中,R为阻尼电阻;L为消弧线圈电感;Z。为系统等效阻抗;Z、为负载等效阻抗。

当系统正常运行时,与阻尼电阻并联的反并联 晶闸管均处于断开状态;当发生短路故障后,两晶闸 管交替导通,迅速将阻尼电阻短路以确保谐振状态 下对故障电流的有效补偿。本文在故障状态下通过 控制原本处于导通状态的晶闸管短时开断,产生频 率含量丰富的扰动电流流入系统,通过对各馈线中



图 1 故障选线实施方案

Fig.1 Implementation scheme of faulty line selection 该扰动电流的检测与分析实现故障线路的判定。

通过以上分析可以看出本文方法有如下优点。

a. 本文方法通过控制消弧线圈自带的电力电子 开关(晶闸管)产生扰动信号用于选线,不需要额外 增加信号注入设备,便于现场实施。

b. 晶闸管开断时间可控,使得在不同大小的接 地电阻下都能产生足够强的扰动信号以被检测到; 扰动信号中直流分量流经故障线路,避免了对地电 容对其分流,这2点有利于保证高阻接地情况下选线 的准确性。

1.2 扰动电流表达式的获取

系统正常运行状态下,控制晶闸管开断等效简化 电路如图 2(a)所示。根据叠加原理,产生用于选线 的扰动电流信号的等效电路如图 2(b)所示。图中,C为单条出线的单相对地电容;n 为出线条数; R_f 为过 渡电阻; i_R 为流过 R_f 的电流; i_R 为流过阻尼电阻的电 流; U_R 为阻尼电阻两端电压; i_L 为流过消弧线圈的电 流; u_L 为消弧线圈两端电压; i_c 为单条线路单相对地 电容电流; u_c 为对地电容两端电压。



图 2 等效分析简化电路图

Fig.2 Simplified circuit for equivalent analysis

设t=0时刻晶闸管基于其端电压以延迟触发角 δ 断开,则晶闸管两端电压 $U_{\rm T}$ 如图 3 所示。由图 3 可知: $-i(t) = -I\sin(\omega t + \delta)$,其中I为i的幅值, ω 为 角频率。

由图2所示的电路可得:

$$\begin{cases} i_{\rm f} = i_{R_{\rm f}} + 3 i_C \\ i_{\rm uf} = 3 i_C \end{cases}$$
(2)



图 3 晶闸管两端电压 Fig.3 Voltage of thyristors

其中,*i*_f和*i*_u分别为故障线路和非故障线路中脉冲 电流的成分。

$$\begin{cases} i_{R}R = R_{f}i_{R_{f}} + L\frac{\mathrm{d}i_{L}}{\mathrm{d}t} \\ i_{L} = i_{R_{i}} + C\frac{\mathrm{d}u_{C}}{\mathrm{d}t} = i_{R_{i}} + CR_{f}\frac{\mathrm{d}i_{R_{f}}}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$
(3)

整理方程得到:

$$\frac{\mathrm{d}^{2}i_{R_{\mathrm{f}}}(t)}{\mathrm{d}t^{2}} + \frac{RR_{\mathrm{f}}C + L}{CLR_{\mathrm{f}}} \frac{\mathrm{d}i_{R_{\mathrm{f}}}(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{R + R_{\mathrm{f}}}{CLR_{\mathrm{f}}}i_{R_{\mathrm{f}}}(t) = \frac{R}{CLR_{\mathrm{f}}}i(t)$$

$$\tag{4}$$

其特征方程为:

$$\Delta_{\rm r} = \left(\frac{RR_{\rm f}C + L}{CLR_{\rm f}}\right)^2 - 4\frac{R + R_{\rm f}}{CLR_{\rm f}}$$

基于实际系统参数通常有 $\Delta_r > 0$,方程有 2 个不同的实数解,此时得到 i_{R_t} 、 i_C 、 i_L 的表达式分别如式 (5)、(6)、(7)所示。

$$i_{R_{1}}(t) = c_{1}e^{r_{1}t} + c_{2}e^{r_{2}t} + a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t)$$
(5)
$$i_{c}(t) = \frac{R_{1}C}{3n} [c_{1}r_{1}e^{r_{1}t} + c_{2}r_{2}e^{r_{2}t} - a\omega\sin(\omega t) + b\omega\cos(\omega t)]$$

$$i_{L}(t) = (R_{f}Cr_{1}+1)c_{1}e^{r_{1}t} + (R_{f}Cr_{2}+1)c_{2}e^{r_{2}t} + (b-a\omega)\sin(\omega t) + (a+b\omega)\cos(\omega t)$$
(7)

$$r_{1} = \frac{-\frac{RR_{f}C + L}{LR_{f}C} + \sqrt{\left(\frac{RR_{f}C + L}{LR_{f}C}\right)^{2} - 4\frac{R + R_{f}}{LR_{f}C}}{2}}{2}$$

$$r_{2} = \frac{-\frac{RR_{f}C + L}{LR_{f}C} - \sqrt{\left(\frac{RR_{f}C + L}{LR_{f}C}\right)^{2} - 4\frac{R + R_{f}}{LR_{f}C}}{2}}{2}$$

$$c_{1} = \frac{ar_{2} - b\omega}{r_{1} - r_{2}}$$

$$c_{2} = \frac{ar_{1} - b\omega}{r_{2} - r_{1}}$$

$$a = \frac{RI\sin\delta(R + R_{f} - \omega^{2}LR_{f}C) - (RR_{f}C + L)\omegaRI\cos\delta}{(R + R_{f} - \omega^{2}LR_{f}C)^{2} + \omega^{2}(RR_{f}C + L)^{2}}$$

$$b = \frac{RI\cos\delta(R + R_{f} - \omega^{2}LR_{f}C) + (RR_{f}C + L)\omegaRI\sin\delta}{(R + R_{f} - \omega^{2}LR_{f}C)^{2} + \omega^{2}(RR_{f}C + L)^{2}}$$

1.3 故障选线判据的建立

 R_{f} =100Ω时,对 i_{f} 和 i_{u} 进行快速傅里叶变换(FFT) 得到脉冲电流频谱分布如图 4 所示。从图 4 中可以 看出,非故障线路中脉冲的直流和低频成分非常少, 远小于故障线路,故障线路和非故障线路十分容易 区分。

在故障线路中,由于存在接地点,检测到的注入 脉冲信号会含有较多的直流和低频成分;而对于非



图 4 过渡电阻为 100 Ω 时的脉冲电流频谱分布 Fig.4 Magnitude distribution of pulse current when $R_f = 100 \Omega$

故障线路,注入的脉冲信号依然只能通过对地电容 形成回路,检测到的脉冲信号中直流和低频成分不 会很多。因此建立故障检测指标如下:

$$I_{\rm cr} = I_0 + I_1 + I_2 \tag{8}$$

其中,*I*₀、*I*₁、*I*₂分别为每条出线检测到的脉冲电流中的直流、1次谐波和2次谐波的幅值;*I*_a最大者即为故障线路。

2 仿真分析

具体的仿真参数设置如下。

a. 系统频率为 50 Hz,总谐波畸变率(THD)为 1.81%,系统中加入随机性干扰;系统线电压有效值 为 10 kV。

b.系统出线共10条,每条出线带负荷2MW,功率因数为0.9滞后。

c. 5 条出线的长度为 15 km,5 条出线的长度为 20 km。架空线参数 :*r*_h=0.45 Ω/km,*l*_h=1.27×10⁻³ H/km,*c*_h=8.9×10⁻⁹ F/km。电缆线路参数 :*c*_e=1.78× 10⁻⁷ F/km,其他参数值与架空线路一致。

d. 消弧线圈略微过补偿;架空线系统的消弧线 圈电感 *L*=2 H,阻尼电阻为 150 Ω;电缆-架空线混 合系统,架空线和电缆出线数分别为 2、8,*L*=0.13 H, 阻尼电阻为 15 Ω。

2.1 仿真结果分析

以 $R_f = 100 \Omega_{\lambda} \delta = 30^{\circ}$ 为例列出相关仿真波形, 图 5 为脉冲信号的波形。





Fig.5 Waveform of pulse current of faulty line and normal line, when $\delta = 30^{\circ}$ and $R_{\rm f} = 100 \ \Omega$

从图 5 可看出,故障线路与非故障线路中脉冲信号的幅值差异明显,对脉冲信号进行 FFT 分析得到各频率下电流信号幅值如图 6 所示,其中故障线路和



的脉冲电流幅值对比 Fig.6 Comparison of pulse current magnitude between faulty line and normal line, when δ =30° and $R_{\rm f}$ =100 Ω

非故障线路的 I_{cr}分别为 0.2641 A 和 2.0636×10⁻⁴ A。

从图 6 中可以看出,脉冲信号的直流和低频成 分在故障线路中的含量远远大于非故障线路,故障 线路的 I_a基本是非故障线路的 1 300 倍,两者差距 十分明显。对故障线路的脉冲信号进行 FFT 后,其 中的低频和直流分量远大于高频分量,随着频率的升 高,幅值基本上越来越小。

整理不同 δ 和 R_{f} 下的故障选线方案的仿真结果如图 7 所示。



图 7 不同延迟触发角和过渡电阻下故障线路和 非故障线路的 I_c 对比

Fig.7 Comparison of $I_{\rm cr}$ between faulty line and normal line with different values of δ and $R_{\rm f}$

分析图 7,可以得到以下结论:

a. *I*_e 随过渡电阻的上升和延迟触发角的降低而减小;

b.即便在高阻接地且采用较小延迟触发角的情况下,故障线路和非故障线路*I*_α的差异仍然明显,本 文的故障选线方案仍然可以准确选出故障线路;

c. 为了让脉冲信号和 *I*_a 在高阻接地故障情况 下有更高的幅值以避免各种干扰因素对选线准确率 的影响,对于高阻接地故障还是应该选用较大的延迟 触发角。

本文也进行了电缆-架空线混合系统的仿真,相 比架空线系统,由于混合系统的线路对地电容增大, 消弧线圈和阻尼电阻对应的整定值都有所变化,导 致应用本文方案时注入的选线信号幅值更大,因此 *I*_e的数值增大,故障线路和非故障线路之间依然有 明显差异,进而实现故障选线。 另外,在过渡阻抗增大时,无论是故障线路还是 非故障线路,电缆-架空线混合系统的脉冲频谱中高 频成分幅值相比架空线系统都有明显的升高,特别 是高阻接地时故障和非故障线路的高频成分几乎没 有区别,这是由于电缆的对地电容较大,容抗降低, 尤其对于高频成分更为明显,所以高频成分更易通 过对地电容而不是过渡电阻形成回路,因此电缆-架 空线混合系统的故障线路和非故障线路中高频成分 区别不大。这也再次说明了 *I*_a应该选用直流和低频 成分组成。

总体而言,当本文方案应用于电缆-架空线混合 系统时,效果基本和架空线系统一致,因此相关分析 基本一致,篇幅所限不再附更多的仿真结果和分析。

2.2 延迟触发角的选择

分析图 2 可以看出,选线方法造成电压扰动的根源为阻尼电阻两端的电压,其变化相对于 10 kV 的电 压等级很小,仿真中也发现选线方案的投入并不会对 电压造成明显影响,因此,选择延迟触发角时主要考虑以下条件。

a.条件1:保证脉冲电流信号有足够强度以被 系统测量装置检测到。

b.条件2:尽量减小对故障电流的影响,使故障 电流保持在合理范围之内。

首先对脉冲信号幅值的影响因素进行分析。

当 $R_{\rm f}$ =100 Ω 时,故障线路中的脉冲信号波形如 图 8 所示。



图 8 R_i=100 Ω 时,不同延迟触发角下故障线路的 脉冲电流波形

Fig.8 Waveform of pulse current in faulty line with different values of δ , when $R_{\rm f}$ =100 Ω

从图 8 可以看出,当过渡电阻相同时,延迟触发 角越大,脉冲电流幅值越大,但是脉冲波形基本相 似,所以延迟触发角只会影响脉冲信号的幅值。

取延迟触发角为 45°,改变过渡电阻,得到故障 线路的脉冲波形如图 9 所示。

由图 9 可以看出,整体上脉冲电流峰值随着过渡 电阻的升高而降低,当过渡电阻较小时,脉冲的衰减 过程持续时间较长;当故障电阻大于 1000 Ω 时,脉 冲电流在衰减过程中出现明显的振荡,经 FFT 处理 后的电流幅值组成的故障选线判据可以有效滤除干 扰,*I*_α的计算不受振荡过程影响,提高了本文选线方 案的可靠性,因此本文不再对脉冲波形的衰减过程 进行详细分析。



Fig.9 Waveform of pulse current in faulty line with different values of $R_{\rm f}$, when $\delta = 45^{\circ}$

总结以上分析可以看出,延迟触发角只会影响脉冲电流的幅值,而过渡电阻在影响脉冲电流峰值的同时,还会影响脉冲电流的衰减过程。

调节 L=1.6 H(原因见后文),得到脉冲电流信号的数据如表1 所示。

表 1 L=1.6 H 时故障电流峰值

<i>P</i> / O		故障电流峰值/A	
$\Lambda_{\rm f}/\Delta L$	$\delta = 25^{\circ}$	$\delta = 45^{\circ}$	$\delta = 180^{\circ}$
0	0.391 554	1.043 233	5.206814
10	0.462150	1.294 269	5.902492
100	0.592694	1.449462	4.917115
200	0.704269	1.538 143	4.057172
500	0.715685	1.353 876	2.402006
1 0 0 0	0.456782	0.802070	1.174743
2000	0.188183	0.314748	0.422096
2500	0.132497	0.219328	0.289078
3 0 0 0	0.097 949	0.160993	0.209556

由表 1 可见,当 δ =180°时,即使过渡电阻 R_f 为 3000 Ω 时,脉冲电流依然大于 0.2 A。同时,对于非 高阻接地的短路故障,脉冲电流强度已经足够,为减 少对故障电流的影响,完全可以牺牲一部分脉冲电 流的强度。

进一步对故障电流因素进行分析如下。

按照相关章程规定,在谐振接地系统中,经消弧 线圈补偿作用后,发生故障时故障电流应该不大于 10 A。按照最恶劣的情况分析故障选线装置对故障 电流的影响,即通过调整参数,使系统发生单相金属 性接地故障时故障电流接近 10 A。

改变消弧线圈的电感值 L,过补偿程度越大,故 障电流也越大。当故障状态下切除阻尼电阻后,对于 架空线系统,L=2H 情况下发生金属性接地故障时, 故障电流峰值约为 3.5 A,提高过补偿程度使 L=1.6 H时,故障电流峰值变为 9.940 37 A,基本达到了相关 章程标准的极限,此时调整 δ 和 $R_{\rm f}$,得到故障电流峰 值如图 10 所示,图 11 为此时发生金属性接地故障且 $\delta=180^{\circ}$ 情况下的故障电流波形。







结合图 10、11 可知,虽然可控短路装置会增加 故障电流瞬时峰值,但即使按照最恶劣的情况,即 $\delta = 180^{\circ}$ 、 $R_{f} = 0 \Omega$ (如图 11 所示),本文的故障选线方 案对于故障电流的影响主要在于使故障电流波形偏 移,且持续时间较短,其最大值和最小值之差并没有 明显变化。进一步分析可知,过渡电阻越小,故障电 流峰值越大,而对于金属性接地故障和过渡电阻较 小的接地故障,选用小的延迟触发角就能够明显减小 故障电流峰值的增长,即使过渡电阻小于 200 Ω , $\delta =$ 25°时故障电流的增长几乎可以忽略;而随着过渡电 阻的增长,故障电流峰值大幅降低,当过渡电阻不小 于 300 Ω 时,即使阻尼电阻接入半个周期,故障电流 峰值依然小于 10 A。

值得注意的是,上述结论都是在故障电流情况 最恶劣,即通过调节过补偿程度,使不投入阻尼电阻 情况下故障电流就处在规定范围的极限的情况下得 到的。而正常情况下,配网处于略微过补偿的状态, 调节消弧线圈令系统达到正常的略微过补偿时 L=2H, 同样在延迟触发角为 180° 且金属性接地故障的状 态下,故障选线装置未动作时,故障电流峰值约为 7 A, 而当选线装置投入运行后峰值约为 9.5 A,符合相关 要求。

综合以上分析,对于过补偿程度正常的谐振接地 系统,本文的选线装置和选线策略仅会使得故障电 流峰值短时间内小幅上涨,不会使故障电流超过规定 值;而对于故障电流情况本来就不太理想的系统,在 发生金属性接地故障和过渡电阻较小的短路故障 时,通过选用合适的延迟触发角,依然可以保证选线 装置投入运行时故障电流不大幅增长。当过渡电阻 大于 500 Ω 时,延迟触发角的增长已经不会使故障 电流进一步增长,符合 2.2 节中的条件 1。 进一步通过仿真得到能够保证脉冲电流幅值在 0.3 A 时的触发角和故障电流数据见图 12。



图 12 脉冲电流幅值为 0.3 A 时的延迟触发角和 故障电流峰值

Fig.12 Firing angle and peak value of fault current when pulse current amplitude is 0.3 A

由图 12 可以看出,随着过渡电阻的增大,为保障脉冲电流有足够大的幅值,应该增加延迟触发角。结合前文数据,当过渡电阻大于 2500 Ω 时应该选用 180°的延迟触发角。而对于金属性接地故障,延迟触发角选用使脉冲电流刚刚达到 0.3 A 的 21.8°时,故障电流从 9.9404 A 增长到 10.4049 A,涨幅仅有 0.4645 A,增长了 4.67%,几乎可以忽略不计,可以 达到故障电流要求。

综上所述,本文选线方案中延迟触发角的选择标 准如下。

a. 对于对故障电流没有严格要求或者过补偿情况的良好系统,可以直接选用较大的延迟触发角,如 180°,可以保证在大部分接地故障时选线脉冲信号的强度。

b. 对于故障电流情况比较恶劣的中性点谐振接 地系统,最理想的选择应该按照图 12 所示的延迟触 发角;发生非高阻接地故障时,应该选用较小的延迟 触发角,如 25°;或者判定系统发生了故障后,先采用 较小的延迟触发角,如不能选出故障线路,则逐级增 大延迟触发角再次进行选线。需要注意的是,当这 类系统发生高阻接地故障时,也应该选用较大的延 迟触发角,如 180°等。

3 模拟实验

模拟实验电路如图 13 所示。实验参数:额定电压 220 V,补偿度 10%,消弧线圈电感 0.77 H,阻尼电阻 40 Ω ,串联电阻 r 为 8 Ω ;2 条线路均为 20 km,带负 荷 1.5 kV·A 线路 1、2 的出线电阻分别为 12、15 Ω , 线路 1、2 的出线电感分别为 25、40 mH,线路 1、2 的出线电容均为 1 μ F,线路 1、2 的单相负荷电阻均为 87 Ω ,线路 1、2 的单相负荷电感分别为 25 mH、40 mH, 线路 1、2 的功率因数均为 0.9;线路 1 发生故障。

模拟实验过程与仿真实验过程类似,过渡电阻为 100 Ω 、延迟触发角为 30° 时的 $I_{\rm er}$ 如图 14 所示。

不同情况下故障线路和非故障线路的脉冲信号 峰值和 L₄分别列于表 2 和表 3。

总体上,当延迟触发角相同时,随着过渡电阻的



图 13 侯似矢驰电路图 Fig.13 Circuit of simulation experiment



图 14 δ =30°、 R_i =100 Ω 时,故障线路和 非故障线路的脉冲电流波形对比 Fig.14 Comparison of pulse current waveform

between faulty line and normal line, when δ =30° and $R_{\rm f}$ =100 Ω

表 2 故障线路和非故障线路的脉冲电流峰值

Table 2 Peak value of pulse current of faulty line and normal line

		脉冲电流峰值/A				脉冲电流峰值/A	
$R_{\rm f}/\Omega$	$\delta/(^{\circ})$	故障	非故障	$R_{ m f}/\Omega$	$\delta/(\circ)$	故障	非故障
		线路	线路			线路	线路
	30	0.017	0.006		30	0.006	0.003
	45	0.029	0.009		45	0.007	0.007
100	60	0.040	0.008	1.000	60	0.012	0.008
100	90	0.080	0.010	1000	90	0.015	0.014
	120	0.110	0.020		120	0.032	0.018
	180	0.170	0.020		180	0.030	0.010
	30	0.013	0.008		30	0.007	0.007
	45	0.020	0.010		45	0.007	0.004
250	60	0.030	0.012	1 500	60	0.012	0.003
230	90	0.048	0.014	1 300	90	0.020	0.004
	120	0.039	0.020		120	0.020	0.004
	180	0.090	0.030		180	0.020	0.003
500	30	0.014	0.003		30	0.009	0.004
	45	0.012	0.010	2000	45	0.015	0.001
	60	0.020	0.010		60	0.010	0.003
	90	0.029	0.012		90	0.016	0.004
	120	0.050	0.020		120	0.016	0.003
	180	0.050	0.004		180	0.017	0.003

表 3	故	て障	线路利	口非故	坆 障纟	战路的 Ι.	r
Table 3	$I_{\rm cr}$	of	faulty	line	and	normal	line

		$I_{ m cr}/{ m A}$				I_{cr}	/A
$R_{\rm f}/\Omega$	$\delta / (^{\circ})$	故障 线路	非故障 线路	$R_{ m f}/\Omega$	$\delta/(\circ)$	故障 线路	非故障 线路
	30	0.0063	9.29×10 ⁻⁵		30	0.0013	7.25×10^{-4}
	45	0.0084	9.48×10 ⁻⁴		45	0.0019	1.31×10^{-4}
100	60	0.0156	1.71×10^{-4}	1000	60	0.0032	2.42×10^{-4}
100	90	0.0196	3.03×10^{-4}		90	0.0055	5.13×10^{-4}
	120	0.0560	2.31×10^{-4}		120	0.0164	4.80×10^{-3}
	180	0.0822	5.22×10^{-4}		180	0.0139	3.40×10 ⁻³
	30	0.0040	1.50×10 ⁻³		30	0.0017	5.59×10 ⁻⁴
	45	0.0040	8.05×10^{-5}		45	0.0019	2.43×10^{-4}
250	60	0.0075	1.52×10^{-4}	1500	60	0.0038	1.54×10^{-4}
230	90	0.0180	1.51×10^{-4}	1300	90	0.0067	2.42×10^{-4}
	120	0.0439	1.85×10^{-4}		120	0.0111	2.94×10^{-4}
	180	0.0350	3.23×10 ⁻⁴		180	0.0112	3.69×10 ⁻⁴
500	30	0.0033	4.35×10 ⁻⁴		30	0.0016	2.48×10^{-4}
	45	0.0046	3.58×10^{-4}	2000	45	0.0018	2.59×10^{-4}
	60	0.0066	1.26×10^{-4}		60	0.0048	3.68×10^{-4}
500	90	0.0075	2.82×10^{-4}		90	0.0074	3.39×10 ⁻⁴
	120	0.0249	1.27×10 ⁻⁴		120	0.0087	4.73×10^{-4}
	180	0.0296	5.85×10^{-4}		180	0.0090	4.19×10^{-4}

障线路和非故障线路有很大不同,但通过 FFT 得到的 I_{cr} 差距更加明显,这也是本文选择 I_{cr} 作为选线 判据的原因。模拟实验的相关结果与前文的理论分 析和仿真分析一致。

4 结论

本文利用消弧线圈自带的用于投切阻尼电阻的 电力电子开关,提出了一种故障选线方案。当线路发 生单相接地故障时,通过控制电力电子开关的导通状 态以改变阻尼电阻的工作状态进而向系统中注入用 于故障选线的脉冲信号,在每条出线对该脉冲信号进 行提取和 FFT 分析,通过比较每条出线 *I*_a 的大小以 准确可靠的选出故障线路。理论分析、仿真分析和模 拟实验都验证了该选线方案的有效性,为解决谐振 接地系统的故障选线问题提供了一种可行的思路。

参考文献:

- [1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京:中国电力 出版社, 2005: 45-47.
- [2] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京:中国电力 出版社,2004:140-142.
- [3] 桑在中,潘贞存,李磊,等. 小电流接地系统单相接地故障选线测 距和定位的新技术[J]. 电网技术,1997,21(10):50-52,55. SANG Zaizhong,PAN Zhencun,LI Lei,et al. A new approach of fault line identification,fault distance measurement and fault location for single phase-to-ground fault in small current neutral grounding system[J]. Power System Technology,1997,21(10): 50-52,55.
- [4] HAO Y,YANG Y,REN Y,et al. Faulted line identification through magnitude and phase angle comparison[J]. China Electric Power Information, 1994, 2: 15-19.
- [5] BALDWIN T, RENOVICH F, SAUNDERS L F. Directional ground

fault indicator for high-resistance grounded systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 325-332.

[6] 张慧芬,潘贞存,田质广,等.一种中低压配电网单相接地故障选 线新方法[J]. 电网技术,2005,29(3):76-80.

ZHANG Huifen, PAN Zhencun, TIAN Zhiguang, et al. A new principle to detect single phase grounding feeder in middle and low voltage distribution networks [J]. Power System Technology, 2005, 29(3):76-80.

- [7] 林湘宁,高艳,刘沛,等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):45-49.
 LIN Xiangning,GAO Yan,LIU Pei,et al. A novel method to identify the single phase-to-earth fault in the neutral uneffectual grounded system using the zero-sequence compensated admittance[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(10):45-49.
- [8] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):5-10.

ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4):5-10.

- [9] 江渝,冉立,刘和平,等. 可调节消弧线圈接地系统单相接地故障的辨识和选线[J]. 电工技术学报,2007,22(8):101-107. JIANG Yu,RAN Li,LIU Heping, et al. Judgment of the grounding fault and fault line selection for resonant network with adjustable arc suppression coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(8):101-107.
- [10] 曾祥君,尹项根,张哲. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(6):84-89.
 ZENG Xiangjun,YIN Xianggen,ZHANG Zhe. Study for negative sequence current distribution and ground fault protection in middle voltage power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(6):84-89.
- [11] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等. 基于暂态零序电流比较的小电流 接地选线研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):48-53.
 XUE Yongduan,FENG Zuren,XU Bingyin,et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(9):48-53.
- [12] 王耀南,霍百林,王辉,等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):54-58.
 WANG Yaonan,HUO Bailin,WANG Hui,et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(6):54-58.
- [13] 吴乐鹏,黄纯,林达斌,等. 基于暂态小波能量的小电流接地故 障选线新方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):70-75.
 WU Lepeng,HUANG Chun,LIN Dabin,et al. Fault line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):70-75.
- [14] CHAARI O, MEUNIER M, BROUAYE F, et al. A new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3):1301-1308.
- [15] 庞清乐,孙同景,钟麦英,等. 基于粗集理论的小电流接地系统 故障选线[J]. 中国电机工程学报,2007,27(4):60-64. PANG Qingle,SUN Tongjing,ZHONG Maiying,et al. Fault line detection based on rough set theory in indirection grounding power system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(4):60-64.
- [16] 李震球,王时胜,吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障 选线新方法及仿真[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):

44-49.

LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17):44-49.

- [17] 潘贞存,张慧芬,张帆,等. 信号注入式接地选线定位保护的分析与改进[J]. 电力系统自动化,2007,31(4):71-75.
 PAN Zhencun,ZHANG Huifen,ZHANG Fan, et al. A new mechanism for reliability transaction of power market based on reliability price discrimination of demand side[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(4):71-75.
- [18] 桑在中,张慧芬,潘贞存,等.用注入法实现小电流接地系统单 相接地选线保护[J].电力系统自动化,1996,20(2):11-12.
 SANG Zaizhong,ZHANG Huifen,PAN Zhencun, et al. Protection for single phase to earth fault line selection for ungrounded power system by injection signal[J]. Automation of Electric Power Systems,1996,20(2):11-12.
- [19] 樊淑娴,徐丙垠,张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统 故障选线方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):91-95.
 FAN Shuxian,XU Bingyin,ZHANG Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(4):91-95.
- [20]张宇,陈乔夫,程路,等. 检测配电网电容电流及辨识高阻接地的新方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(8):83-87,101.
 ZHANG Yu,CHEN Qiaofu,CHENG Lu,et al. Novel method for measuring capacitive current and distinguishing high-resistance grounding of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(8):83-87,101.
- [21] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号法的经消弧线 圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):29-32,36.
 ZENG Xiangjun,YIN Xianggen,YU Yongyuan,et al. New methods for control and protection relay in a compensated medium voltage distribution network based on injection various

frequency current[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(1):
29-32,36.
[22] 朱珂,张鹏,徐文远. 一种基于可控短路的故障选线方案[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):1-7.

ZHU Ke,ZHANG Peng,XU Wenyuan. Faulty line identification using controllable-short-circuits [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(11):1-7.

- [23] 朱珂,裴佑楠,陈晨,等. 自适应控流型故障选线方案[J]. 电工 技术学报,2009,24(8):174-182.
 ZHU Ke,PEI Younan,CHEN Chen,et al. Self-adaptable and current controllable faulted line identification scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(8):174-182.
- [24] 陈维江,蔡国雄,蔡雅萍,等. 10 kV 配电网中性点经消弧线圈并 联电阻接地方式[J]. 电网技术,2004,28(24):56-60.
 CHEN Weijiang,CAI Guoxiong,CAI Yaping,et al. Neutral grounding mode in 10 kV distribution network via Peterson coil with parallel resistance[J]. Power System Technology,2004,28 (24):56-60.
- [25] 明志强,许虎. 经消弧线圈接地系统的中电阻快速选线方法[J].
 电网技术,2009,33(12):112-114.
 MING Zhiqiang,XU Hu. Middle resistance fault line selection method in resonant grounded system[J]. Power System Technology,

2009, 33(12): 112-114.

- [26] WANG Wencong, ZHU Ke, ZHANG Peng, et al. Identification of the faulted distribution line using thyristor-controlled grounding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):52-60.
- [27] 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,2009:46.

朱 珂(1977-),男,山东兖州人,副教授,博士,主要研究



方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail: sduzhuke@hotmail.com);

王怡轩(1991—), 男, 山东济南人, 工程 师, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保 护和电能质量(E-mail: wangbrave@hotmail. com):

河 倪 建(1988—),男,山东潍坊人,工程 师,硕士,主要研究方向为电力系统继

电保护(E-mail:njhorse123@sina.com)。

Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system

ZHU Ke¹, WANG Yixuan², NI Jian³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,

Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. State Grid Ji'nan Power Supply Corporation, Ji'nan 250012, China;

3. State Grid Weifang Power Supply Corporation, Weifang 261021, China)

Abstract: A faulty line detection method without additional signal injection device is proposed for arc suppression coil grounding system: when single-phase grounding fault occurs in a feeder, the damping resistor is switched for a short time by power electronic switches connected to arc suppression coil to generate a disturbance current signal with various frequency components, then the faulty line is selected by detecting and analyzing the disturbance current signal in lines. The proposed method requires no additional signal generating device and can be applied under high impedance fault. Theoretical analysis, simulative analysis and laboratory experiments all verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: grounding system; arc suppression coil; active disturbance; faulty line selection; damping resistor

(上接第 176 页 continued from page 176)

Electronic voltage-regulating furnace transformer and its control strategy

XIAO Jun, MAO Chengxiong, WANG Dan, LIANG Yu, ZHANG Gaoyan, WANG Yuanchao

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The complex voltage-regulating winding and frequent tap changer adjusting of traditional furnace transformer have serious impacts on power supply reliability, reducing its service life and bring adverse effects on power quality and production quality. A novel electronic voltage-regulating furnace transformer is proposed, which adjusts the output of work winding by transformer with high voltage winding, work winding and control winding and three interoperable converters. In this way, the tap changers can be removed or greatly decreased, and the output voltage adjusted continuously, thereby the reliability and quality of power supply are greatly improved. The topology structure of the electronic voltage-regulating furnace transformer is analyzed in detail and its coordination control strategy is proposed. Simulative results show that the proposed electronic voltage regulating furnace transformer has good performance.

Key words: electronic voltage-regulating; furnace transformer; power quality; reliability; control strategy

196

作者简介: