

新型谐振接地系统接地故障全补偿方法

杨磊¹, 曾祥君¹, 喻锐¹, 余敏琪¹, 周宁², 冯光²

(1. 长沙理工大学 智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410014;

2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要:针对传统消弧线圈无法补偿有功电流和抑制间歇性接地故障等难题,提出了一种谐振接地系统接地故障全补偿新方法。系统正常运行时,通过注入信号谐振精确测量系统对地绝缘参数,根据绝缘参数计算补偿元件值;当发生接地故障时,利用故障电流的相位选出故障相,然后在故障相的滞后相投入阻容性补偿元件,将故障相电压抑制为0,实现接地故障电流全补偿。仿真分析表明,所提方法不受过渡电阻影响,能快速抑制故障相电压,实现配电系统接地故障电流的全补偿,有效抑制间歇性接地故障,且操作简单可靠、成本低。

关键词:谐振接地系统;单相接地故障;故障消弧;故障相电压;全补偿

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.009

0 引言

配电系统包含发电机和配电网,结构复杂、环境多变,且与用户联系紧密,极易引发单相接地故障,如不及时处理,易造成人身触电、设备烧毁,甚至引发大面积停电事故,带来巨大的经济损失。

为抑制接地故障,我国配电系统大多数采用中性点经消弧线圈接地方式^[1],通过补偿接地电流中的电容电流来抑制故障电流,实现接地故障消弧。但随着电缆网络的大量增加以及非线性负荷和电力电子设备的大量接入,故障电流中含有大量的有功分量及谐波分量,而传统的消弧线圈只能补偿故障电流中的无功分量,不能补偿其有功分量(约占2%~8%)和谐波分量(约占5%),部分配电网接地故障电流经消弧线圈补偿电容分量后仍高达几十安培,足以维持电弧燃烧,不符合电网规程运行的要求。另外,传统的消弧线圈对绝缘故障引起的间歇性弧光接地故障抑制效果有限,且容易产生弧光过电压(最大可达额定电压的7倍),导致高压电器设备烧毁,甚至引发火烧连营事故,造成大面积停电^[2]。为此,瑞典Swedish Neutral公司提出了注入电流调控系统零序导纳回归正常值的接地故障全补偿方法^[3],其补偿效果取决于零序电流的测量精度与注入电流的控制精度,但成本高昂,1套装置的售价达400万元;文献[4]提出了一种基于主从逆变器的无感消弧有源接地补偿系统,文献[5]提出了一种三相五柱双二

次绕组的零残流消弧线圈。但以上方法均以故障全电流为补偿目标,实现复杂,且同样无法抑制绝缘故障引起的间歇性电弧,难以推广应用。

近年来,随着电缆网络的大量增加,由电缆绝缘故障引起的间歇性弧光接地故障越来越多。为抑制间歇性弧光接地故障,通过调控故障相电压,阻止电弧重燃实现消弧是一个新的研究方向^[6-7]。该方法的典型应用就是消弧柜,其采用断路器直接将接地故障相短路,使得故障相电压为0,从而实现接地故障消弧。但消弧柜存在多方面的缺点,如故障选相正确率低,开关动作慢,发生短路故障时会给系统带来巨大冲击等,具有较大的局限性^[8-10]。

随着电力电子技术和计算机控制技术的发展,配电网接地故障电流抑制技术有了更进一步的发展。笔者所在团队顺应国内外故障消弧技术发展的动态趋势,首先提出了通过注入电流柔性调控零序电压的有源消弧方法^[11],即发生单相接地故障时,通过注入零序电流,调控零序电压为故障相电压的相反数,从而抑制故障相电压为0,实现接地故障消弧;文献[12]提出了一种通过电力电子设备向配电网注入电流调控故障相电压为0的有源消弧算法;文献[13]提出了磁控可调电抗器和有源补偿器配合使用的全补偿消弧方法,采用柔性控制策略补偿接地故障全电流。但以上方法需要采用电力电子设备调控注入电流,其调控过程复杂,稳定性和可靠性难以保证,且电力电子设备成本高昂,难以大面积推广应用。因此,文献[14]提出了在中性点电阻接地超前相和中性点电抗接地超前相接电感的电流补偿方法,该方法建立在对地绝缘参数已知、故障相已知的条件下,但文中并未分析对地绝缘参数的测量方法及选相方法,且补偿过程中需要同时调节中性点阻抗和补偿元件的阻抗值,操作相对复杂,实际应用受到限制。文献[15]提出了从中性点不接地系统的故障相的超前相对地接入阻感性补偿元件补偿接

收稿日期:2017-08-20;**修回日期:**2018-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51737002);湖南省研究生科研创新项目(CX2017B480);国家电网公司科学技术项目(52170217000S)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51737002), the Research and Innovation Project for Graduate Students of Hunan Province(CX2017B480) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52170217000S)

地故障电流,但该方法需要投入的电感值较大,补偿元件体积较大,成本较高且不方便调节,仅适用于中性点不接地系统。

为此,本文提出了一种谐振接地系统接地故障全补偿方法:系统正常运行时,通过注入信号谐振精确测量系统对地绝缘参数,根据绝缘参数计算补偿元件值;当配电系统发生接地故障时,利用故障电流的相位选出故障相,然后在故障相的滞后相投入阻容性补偿元件,将故障相电压抑制到 0,实现接地故障电流全补偿。所提方法操作简便、可靠性高,能有效抑制间歇性弧光接地故障,且补偿需要投入的元件电容值小、体积小、调节方便、成本低,具有广阔的应用前景。

1 配电系统对地绝缘参数测量

传统的配电网对地绝缘参数测量方法主要分为直接法和间接法:直接法主要为单相金属接地法,该方法必须在电网一次侧进行操作,操作复杂,且存在安全隐患;间接法主要为外加电容法,即在线路上外加 1 个电容,通过测量零序电压变化量计算电容,但测量时仍需操作一次设备,操作复杂,准备时间长,测量精度受电网自然不对称度的影响,且存在安全隐患。现有基于位移电压曲线求解方程的电容电流在线测量方法在测量时需要改变消弧线圈电感,测量精度不高,且实现困难。

为此,文献[15]提出了一种外加偏置元件(电阻元件)测量电网电容电流和绝缘电阻,虽可消除电网参数不对称的影响,但测量时仍需对一次设备进行操作,操作复杂,准备时间长,且只能适用于中性点不接地系统。为实现谐振接地系统对地绝缘参数的精确测量,本文提出了一种基于注入信号的谐振测量方法^[16],原理如下。

注入信号谐振测量原理如图 1 所示。图中, E_A 、 E_B 、 E_C 分别为各相电源电压; r_A 、 r_B 、 r_C 分别为电网各相对地电阻; C_A 、 C_B 、 C_C 分别为电网各相对地电容;中性点 N 经消弧线圈接地, L 为消弧线圈电感; I_i 为从消弧线圈二次侧注入的变频电流信号。改变 I_i 的频率,测量返回的电压信号 U_i 和 I_i 的大小、相位

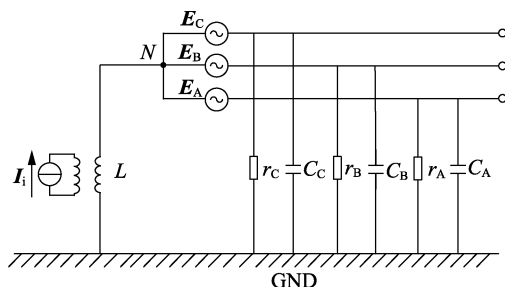


图 1 注入信号谐振测量原理图

Fig.1 Principle diagram of resonant measurement with signal injection

关系,寻找系统的谐振角频率 ω 。

注入信号谐振测量等效电路如图 2 所示。根据图 2 计算配电网对地电容如式(1)所示。

$$C_{\Sigma} = 1/(\omega^2 L) \quad (1)$$

其中, $C_{\Sigma} = C_A + C_B + C_C$ 。

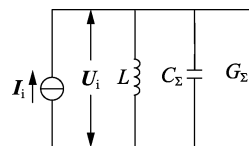


图 2 注入信号谐振测量等效电路

Fig.2 Resonance measurement equivalent circuit with signal injection

配电网对地的总电导如式(2)所示。

$$G_{\Sigma} = I_i/(n^2 U_i) \quad (2)$$

其中, $G_{\Sigma} = \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_C}$; I_i 、 U_i 分别为 I_i 、 U_i 的大小; n 为消弧线圈一次绕组与二次绕组的变比。

本文所提基于注入信号的谐振测量方法的优点为:操作简单,实现了配电网对地电容和对地电阻的实时测量;检测参数少,无需整定其他参数,不受配电网运行方式等因素的影响,测量精度高;从低压侧测量电网参数,安全快速,不影响系统正常运行。

2 接地故障全补偿方法

图 3 为 10 kV 系统接地故障全补偿原理图。图中, R_T 、 C_T 为补偿元件。

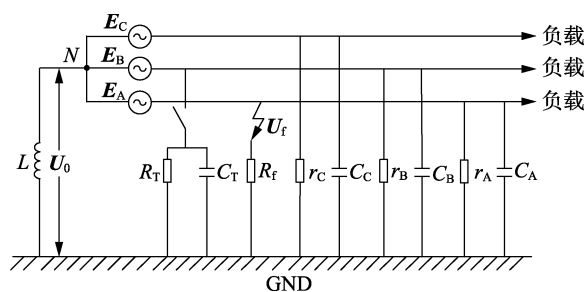


图 3 接地故障全补偿原理图

Fig.3 Principle diagram of full compensation for grounding fault

设电网正常运行时中性点不平衡电压为 U_{bd} , 则有:

$$U_{bd} = \frac{-E_A k_A}{G_{\Sigma} + j\omega C_{\Sigma} - j/(\omega L)} \quad (3)$$

其中, $k_A = Y_A + a^2 Y_B + a Y_C$, $Y_A = 1/r_A + j\omega C_A$, $a = 1 \angle 120^\circ$, $Y_B = 1/r_B + j\omega C_B$, $Y_C = 1/r_C + j\omega C_C$ 。

设 A 相发生单相接地故障,故障电阻为 R_f ,零序电压为 U_{0f} ,补偿元件投入前,对电网中性点 N 列写节点电压方程如式(4)所示。

$$U_{01} \left(\frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_f} + G_\Sigma + j\omega C_\Sigma \right) = -E_A \left(\frac{1}{R_f} + Y_A \right) - E_B Y_B - E_C Y_C \quad (4)$$

简化得:

$$U_{01} = \frac{-E_A k_A - E_A / R_f}{1/R_f + G_\Sigma + j\omega C_\Sigma - j/(\omega L)} \quad (5)$$

此时故障相电压 $U_A = U_{01} + E_A$ 。联立式(3)和式(5)可解得故障电流为:

$$I_f = \frac{U_A}{R_f} = (U_{bd} - U_{01}) \left(G_\Sigma + j\omega C_\Sigma - j \frac{1}{\omega L} \right) \quad (6)$$

由式(6)可知,当电网参数已知时,只需测量发生接地故障前后的零序电压变化量即可计算出故障电流;且故障电流的相位与故障相电压的相位相同,因此可以根据故障电流的相位选出故障相,不受接地故障电阻影响,选相准确率高。

接地故障发生后,在故障相的滞后相与地之间外加一个补偿元件(由电阻与电容并联组成),通过调控零序电压实现接地故障电流全补偿。设补偿元件投入后的零序电压为 U_{02} ,则有:

$$U_{02} \left(\frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_f} + G_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{R_T} + j\omega C_T \right) = -E_A \left(k_A + \frac{1}{R_f} \right) - E_B \left(\frac{1}{R_T} + j\omega C_T \right) \quad (7)$$

简化得:

$$U_{02} = \frac{-E_A (k_A + 1/R_f) - E_B (1/R_T + j\omega C_T)}{1/R_f + G_\Sigma + 1/R_T + j\omega C_T + j\omega C_\Sigma + 1/(j\omega L)} \quad (8)$$

令式(8)中的 $U_{02} = -E_A$,即零序电压和故障相电源电压的大小相等、相位相反,从而使得故障相电压为 0。

将 $E_B = a^2 E_A$ 代入式(8),并令 $U_{02} = -E_A$,此时 R_T 、 C_T 应满足:

$$\begin{cases} R_T = \frac{1}{\frac{1}{2} k_A - \frac{1}{2} G_\Sigma - \frac{\sqrt{3}}{6} \omega C_\Sigma + \frac{\sqrt{3}}{6\omega L}} \\ C_T = -\frac{\sqrt{3} k_A}{6\omega} + \frac{\sqrt{3} G_\Sigma}{6\omega} - \frac{1}{2} C_\Sigma + \frac{1}{2\omega^2 L} \end{cases} \quad (9)$$

因为 k_A 是一个复数,式(9)中的 R_T 、 C_T 计算较困难。可令 $k_A = G_{Ak} + jY_{Ak}$,代入式(8)中,再令 $U_{02} = -E_A$,可得:

$$\begin{cases} R_T = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} G_{Ak} - \sqrt{3} G_\Sigma - \omega C_\Sigma + \frac{1}{\omega L} + Y_{Ak}} \\ C_T = \frac{\sqrt{3} G_\Sigma}{6\omega} - \frac{1}{2} C_\Sigma + \frac{1}{2\omega^2 L} - \frac{\sqrt{3} G_{Ak}}{6\omega} + \frac{Y_{Ak}}{2\omega} \end{cases} \quad (10)$$

当补偿元件的参数满足式(10)时,故障相电压

$U_A = 0$,此时电网 B 相的电压为:

$$U_B = E_B - E_A = \sqrt{3} E_A \angle -150^\circ \quad (11)$$

此时流经补偿元件的电流为流经电阻 R_T 的电流和流经电容 C_T 的电流的叠加:

$$I_T = I_{TC} + I_{TR} \quad (12)$$

$$\begin{cases} I_{TC} = j\omega C_T U_B \\ I_{TR} = \frac{1}{R_T} U_B \end{cases} \quad (13)$$

其中, I_{TC} 为电容 C_T 支路产生的电流; I_{TR} 为电阻 R_T 支路产生的电流。

联立式(10)~(13)可解得:

$$I_T = E_A \left(G_\Sigma + j\omega C_\Sigma - j \frac{1}{\omega L} \right) - E_A k_A \quad (14)$$

根据式(12)、(13)可绘出相电压 U_B 在补偿元件上产生的电流相量图,如附录中图 A1 所示。

由式(14)可知,补偿元件在 B 相产生的电流与 A 相发生单相接地故障时的故障电流大小相等,即实现了接地故障电流的全补偿,且该方法消除了电网对地参数不对称的影响。

由式(10)可知,投入的补偿电阻值与电容值和系统接地故障过渡电阻无关,只与系统的参数有关,若系统对地参数完全对称,即 $C_A = C_B = C_C$ 、 $r_A = r_B = r_C$,则有 $U_{bd} = 0$ 、 $k_A = 0$,只需令式(10)中的 $G_{Ak} = 0$ 、 $Y_{Ak} = 0$,即可得到所需的 R_T 和 C_T ,所以结论依然成立。

以上分析均未考虑线路压降的影响,当线路负荷电流较大时,如果发生绝缘闪络故障或机械性永久接地故障,则故障点与电源母线之间的压降较大,即使故障相电压降低为 0,故障点还存在一定的电压和电流,难以保证故障点彻底熄弧。因此,若要使故障点电压降低为 0,需保证故障点彻底熄弧,可令式(8)中的 $U_{02} = -E_A + \Delta U_A$ (ΔU_A 为接地故障点与电源母线之间的线路压降),则可将故障点电压完全抑制到 0,实现故障点的彻底熄弧。

将 $U_{02} = -E_A + \Delta U_A$ 代入式(8)即可得到 R_T 和 C_T 应满足的表达式,故障电流与补偿元件流经的电流分析与上述分析类似,这里不再阐述。

3 接地故障全补偿方法流程图

由式(8)可知,系统未发生故障时零序电压与阻容性补偿元件 R_T 和 C_T 相对应,其关系式如式(15)所示。

$$U_{0set} = \frac{-E_A k_A - E_B (1/R_{set} + j\omega C_{set})}{G_\Sigma + 1/R_{set} + j\omega C_{set} + j\omega C_\Sigma + 1/(j\omega L)} \quad (15)$$

其中, C_{set} 、 R_{set} 为补偿元件的设定值。

因此,可在投入补偿元件后通过改变补偿元件

值判断接地故障是否已经消除;若改变补偿元件值,零序电压的变化规律如式(15)所示,则判断接地故障已消除,否则判断为永久性接地故障。

配电网接地故障电流全补偿方法流程图如图4所示。首先测量配电网正常运行时的对地绝缘参数,根据绝缘参数计算补偿元件值;通过检测零序电压判断是否发生单相接地故障,若发生单相接地故障,则利用计算的故障电流相位判断故障相,然后在故障相的滞后相投入阻容性补偿元件,延时5 s后改变补偿元件阻抗值,测量零序电压是否按式(15)变化,若按式(15)变化,则判断接地故障已消除,退出补偿元件;否则判断为永久性接地故障,重新将补偿元件阻抗值调整至全补偿状态(即式(10)),实现接地故障电流全补偿。

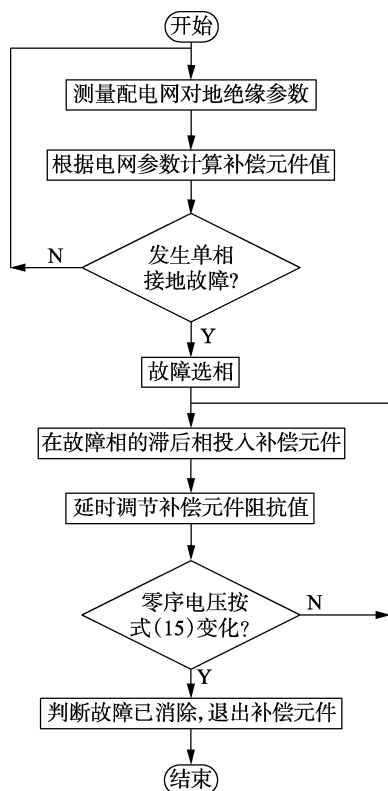


图4 接地故障全补偿方法流程图

Fig.4 Flowchart of full compensation for single-phase grounding fault

4 仿真分析

利用 PSCAD 软件仿真验证本文方法的效果。按照图3搭建10 kV配电网仿真模型,仿真参数为: $L=0.25\text{ H}$; $C_A=10.21\text{ }\mu\text{F}$, $r_A=10.67\text{ k}\Omega$; $C_B=9.64\text{ }\mu\text{F}$, $r_B=10.65\text{ k}\Omega$; $C_C=10.81\text{ }\mu\text{F}$, $r_C=10.56\text{ k}\Omega$; $C_\Sigma=30.66\text{ }\mu\text{F}$; $G_\Sigma=2.82\times 10^{-4}\text{ S}$; $k_A=-3.18\times 10^{-4}-j1.35\times 10^{-6}$ 。

设置配电网A相发生单相接地故障,故障发生时刻为0.04 s,故障电阻为200 Ω ,0.1 s时在故障相的滞后相B相投入阻容性补偿元件,补偿元件值按

式(10)设定,则 $C_T=5.51\text{ }\mu\text{F}$, $R_T=1\text{ }670.98\text{ }\Omega$ 。图5(a)~(c)分别为接地故障电阻为200 Ω 时对应的故障电流波形、零序电压波形、故障相电压波形。

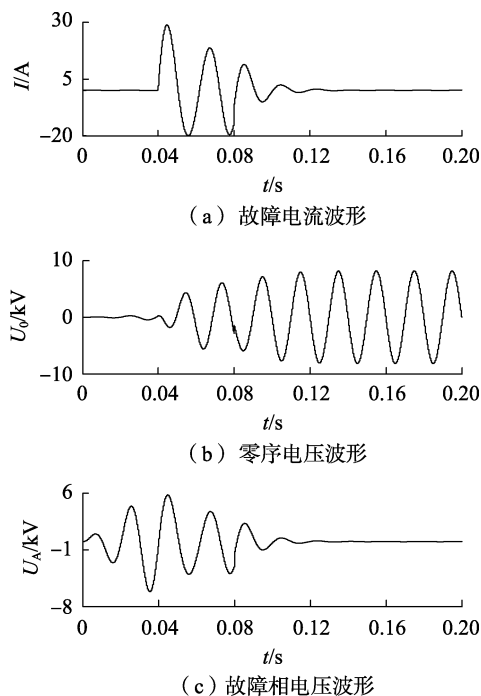


图5 接地电阻为200 Ω 时的仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms when $R_f=200\text{ }\Omega$

由图5可知,当0.1 s时投入阻容性补偿元件后,故障电流被快速补偿,电网零序电压提升至故障相电源电压,从而将故障相电压抑制为0,实现故障电流全补偿。

为验证本文所提方法在发生低阻接地故障时的有效性,对A相发生接地故障电阻为8 Ω 的接地故障)进行仿真,仿真结果如图6所示。

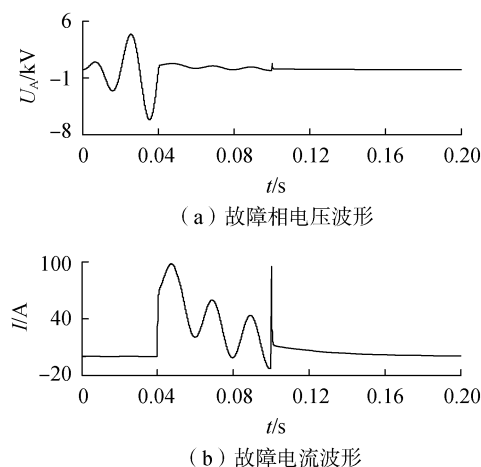


图6 接地电阻为8 Ω 时的仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms when $R_f=8\text{ }\Omega$

将故障电阻值分别为8 Ω 、25 Ω 、200 Ω 、500 Ω 、2 000 Ω (其他仿真条件不变)时阻容性补偿元件投入前、后的仿真结果汇总如表1所示。由表1可

知,阻容性补偿元件的补偿效果不受故障过渡电阻的影响,发生接地故障后投入补偿元件可快速实现故障相电压和电流的抑制,实现接地故障电流全补偿,有效抑制间歇性弧光接地故障,抑制率高达 99% 以上。

表 1 仿真结果

Table 1 Simulative results

故障 电阻/ Ω	故障电流幅值/A		故障电压幅值/V		抑制 率/%
	补偿元件 投入前	补偿元件 投入后	补偿元件 投入前	补偿元件 投入后	
8	95.00	0.580	760	5.4	99.3
25	26.30	0.120	640	2.8	99.5
200	21.00	0.080	4 150	16.0	99.6
500	11.20	0.061	5 450	31.0	99.5
2 000	3.96	0.016	8 080	33.0	99.6

5 结论

本文提出了一种谐振接地系统接地故障电流全补偿方法,系统正常运行时,通过注入信号谐振精确测量系统对地绝缘参数,根据绝缘参数计算补偿元件值;当配电系统发生接地故障时,利用故障电流的相位选出故障相,然后在故障相的滞后相投入阻容性补偿元件,将故障相电压抑制为 0,实现接地故障电流全补偿。仿真结果表明,本文方法不受过渡电阻影响,能快速抑制故障相电压,实现配电系统接地故障电流的全补偿,有效抑制间歇性弧光接地故障。

本文方法弥补了传统消弧线圈不能补偿有功电流和无法抑制间歇性接地故障的不足,且与故障相超前相投入阻感性补偿元件的方法相比,操作简单可靠,需要投入的补偿元件电容值小,补偿元件体积小,调节方便、成本低,因而其在实际应用中更具可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郑鹏鹏. 配电网消弧装置应用中相关问题的研讨[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 115-118.
ZHENG Pengpeng. On arc suppression device application in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 115-118.
- [2] KALYUZHNY A. Analysis of temporary overvoltages during open-phase faults in distribution networks with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 420-427.
- [3] WINTER K M. The RCC ground fault neutralizer—a novel scheme for fast earth-fault protection[C]//18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, Italia: IET, 2005: 32-37.
- [4] 陈忠仁, 张波. 基于主从逆变器的无感消弧有源接地补偿系统[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 62-67.
CHEN Zhongren, ZHANG Bo. Non-inductive arc-suppression and active grounding compensation system based on master-slave inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 62-67.
- [5] 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.
- [6] WANG Wen, ZENG Xiangjun, YAN Linjie, 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.
- [7] 朱晓娟, 林圣, 张姝, 等. 基于小波能量矩的高阻接地故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 161-168.
ZHU Xiaojuan, LIN Sheng, ZHANG Shu, et al. High-impedance grounding fault detection based on wavelet energy moment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 161-168.
- [8] 李新泉, 齐郑, 杨以涵. 消弧线圈与接地故障转移装置配合使用的消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 71-75.
LI Xinquan, QI Zheng, YANG Yihan. Arc-suppression method for coordinated using of arc-extinguish coil with grounded-fault transfer device[J]. Automation of Electric Powers Systems, 2008, 32(19): 71-75.
- [9] 胡京莹, 王阳, 花欢欢. 配电网消弧柜系统接地故障负序电流分析新方法及选线[J]. 电气技术, 2013, 14(5): 18-22, 44.
HU Jingying, WANG Yang, HUA Huanhuan. Analysis and line selection based on negative-sequence current for sparc cather grounding system in distribution network[J]. Electric Technologies, 2013, 14(5): 18-22, 44.
- [10] HUANG Yue, ZENG Xiangjun, ZENG Ming, et al. Theory research on the operation control technology in spark catcher grounded power system[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Tianjin, China: IEEE, 2012: 1-5.
- [11] 曾祥君, 王媛媛, 李建, 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.
- [12] 刘维功, 薛永端, 徐丙垠, 等. 可适应线路结构动态变化的有源消弧算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 2008-2013.
LIU Weigong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An active arc-suppression algorithm adaptable to dynamic structure variation of transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 2008-2013.
- [13] 陈柏超, 王朋, 沈伟伟, 等. 电磁混合式消弧线圈的全补偿故障消弧原理及其柔性控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 311-318.
CHEN Baichao, WANG Peng, SHEN Weiwei, et al. The principle of full compensation arc suppression and flexible control of electromagnetic hybrid Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 311-318.
- [14] 唐铁, 陈奎, 陈庆, 等. 单相接地故障全电流补偿的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 558-562.
TANG Yi, CHEN Kui, CHEN Qing, et al. Research on the full current compensation of one-phase-to-ground fault[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(5): 558-562.
- [15] 刘宝稳, 马宏忠, 沈培锋, 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.

- [16] 曾祥君,于永源,尹项根,等. 基于注入信号法的消弧线圈自动调谐新技术[J]. 电力系统自动化,2000,24(9):38-41.
ZENG Xiangjun, YU Yongyuan, YIN Xianggen, et al. Novel technique for Petersen-coil tuning based on injecting current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 38-41.

作者简介:



杨磊

杨磊(1993—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 1014042012@qq.com);

曾祥君(1972—),男,湖南邵阳人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: eexjzeng@qq.com);

喻 锐(1989—),男,湖南长沙人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 1393009168@qq.com);

余敏琪(1994—),女,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 252066208@qq.com);

周 宁(1971—),男,河南洛阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为配电网故障分析与处理、智能电网及电力系统可靠性分析(E-mail: zhouningzz@sina.com);

冯 光(1984—),男,河南民权人,高级工程师,硕士,主要研究方向为智能配电网、电力系统可靠性分析及配电智能设备试验检测(E-mail: qingzhu0301@163.com)。

Novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system

YANG Lei¹, ZENG Xiangjun¹, YU Kun¹, YU Minqi¹, ZHOU Ning², FENG Guang²

(1. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410014, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to solve the problems that the traditional arc suppression coil cannot compensate the active current nor suppress the intermittent-arc grounding fault, a novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system is proposed. In the normal state of resonant grounding system, the values of compensation components are calculated based on the system insulation parameters precisely measured by injecting signal resonance. When single-phase grounding fault occurs, the fault phase is selected by the phase of the fault current. Then the resistance capacitive compensation components are put into the lagging phase of the fault phase, so that the fault phase voltage can be suppressed to zero and the grounding fault current can be fully compensated. The simulative analysis shows that immune to the transition resistance, the proposed method can quickly suppress the fault phase voltage, realize full compensation of the grounding fault current for the distribution system and effectively suppress the intermittent grounding fault, meanwhile, its operation is simple and reliable, and its cost is low.

Key words: resonant grounding system; single-phase grounding fault; arc suppression; fault phase voltage; full compensation

(上接第56页 continued from page 56)

Parameter coordination of generator-side and grid-side multi-channel supplementary damping controllers to suppress low-frequency oscillation and sub-synchronous oscillation comprehensively

CHEN Baoping¹, LIN Tao¹, CHEN Rusi¹, ZHANG Jiannan¹, SHENG Yibiao¹, XU Xialing²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Central China Electric Power Dispatching and Communication Center, Wuhan 430077, China)

Abstract: Because of the damping coupling between the LFO (Low-Frequency Oscillation) and SSO (Sub-Synchronous Oscillation), the controllers designed for a specific oscillation mode may have adverse effects on the oscillation modes of other frequency bands. Taking both LFO and SSO into account, the generator-side and grid-side supplementary damping controllers are designed based on the mode-separation method, and the damping coupling issue is transformed into a parameter coordinative optimization problem among controllers. The LFO and SSO are suppressed comprehensively and the damping coupling between modes is minimized by coordinating the parameters of controllers and channels corresponding to the same oscillation mode. The damping ratio threshold of SSO mode is dynamically set in the coordinative optimization process, that is, the larger the frequency of SSO mode, the smaller the required threshold of the damping ratio. Both eigenvalue analysis and time-domain simulation results show that the proposed coordinative control strategy can significantly improve the damping characteristics of the objective frequency bands, and it has better damping effects than the conventional damping control strategy.

Key words: low-frequency oscillation; sub-synchronous oscillation; damping coupling; generator-side/grid-side multi-channel supplementary damping controllers; dynamic damping ratio; coordinative optimization

附录

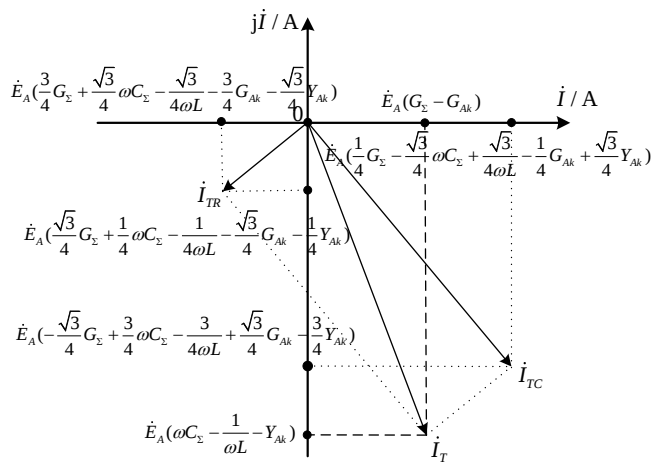


图 A1 单相接地故障电流全补偿原理图

Fig.A1 Principle diagram of current compensation for single-phase grounding fault