DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201357

基于 PWM 可控变换器的接地残流全补偿控制方法研究

王 鹏[1]，冯 光[1]，王 晗[2]，陈 明[1]，张建文[2]，施 刚[2]，贾雅君[2]

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院，河南 郑州 450052；2. 上海交通大学风力发电研究中心，上海 200240)

摘要：针对配电网中传统全补偿消弧装置接地残流实时补偿能力差且在故障恢复后长期处于谐振状态而不能及时退出的问题，提出基于 PWM 可控变换器的接地残流全补偿控制方法。对全补偿消弧装置的消弧原理进行了详细分析，并利用主动频率注入法实现对地电容的精确检测。从理论上推导了零序电压与接地残流分量的关系，提出单相接地残流全补偿的实时控制方法。利用主动阻尼电流注入法实时检测接地故障恢复，并给出主动阻尼电流数值的计算依据。最后，对某 10 kV 配电网的单相接地故障进行了数字仿真研究。仿真结果表明，接地故障电流能够得到快速有效的全补偿，故障恢复后全补偿装置能够快速退出运行，验证了所提控制策略的正确性和可行性。

关键词：单相接地故障；PWM 可控变换器；全补偿消弧线圈；残流补偿；主动阻尼电流

A residual current compensation control method based on a PWM-controlled converter

WANG Peng[1], FENG Guang[1], WANG Han[2], CHEN Ming[2], ZHANG Jianwen[2], SHI Gang[2], JIA Yajun[2]

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hehan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;
2. Shanghai Jiao Tong University Wind Power Research Center, Shanghai 200240, China)

Abstract: There is a problem of poor real-time compensation ability of a grounding residual current of traditional full compensation arc suppression device in a distribution network. There is also a long-time resonance state after fault recovery. Thus a full compensation control method of grounding residual current based on a PWM-controllable converter is proposed. The principle of full compensation fault arc suppression is discussed in detail, and the capacitance to ground is measured by the frequency sweep method. The relationship between zero sequence voltage and residual current component is theoretically deduced, and a real-time control method of residual current full compensation is proposed. The active damping current injection method is used to detect the ground fault recovery in real time, and the calculation basis of active damping current is analyzed theoretically. Finally, a digital simulation study on the compensating effect of the fault current based on a 10 kV single-phase grounding distribution network is carried out. The results show that the grounding fault current can be compensated for quickly and effectively, and the full compensation device can quickly exit the operation after the fault recovery. This shows the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1501300) and the Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company (No. SGHADK00PJJS2000062).

Key words: single-phase ground fault; PWM-controlled converter; full compensation arc suppression coil; residual-current compensation; active damping current

0 引言

随着城市配电网容量的日益增大，单相接地故障后系统对地电容电流随之增大[1-3]，而传统消弧线圈无法实现对接地故障电流有功分量与谐波分量的全补偿，使得接地残流难以控制在规定范围内，接地残流全补偿控制技术成为当前研究的热点。

目前低压配电网广泛采用无源消弧算法实现接地残流的补偿[4-5]：一种方法是在配电网的中性点接入消弧线圈，但采用的预调式消弧线圈需要进行反复调节与测试[6]，且体积庞大，只能补偿接地电流中的容性成分；另一种方法是采用消弧柜进行消弧[7]，但该方法容易引发谐振过电压。

基金项目：国家重点研发计划项目资助(2018YFB1501300)；国网河南省电力公司科技项目资助(SGHADK00PJJS2000062)

随着电力电子技术的发展，出现了基于有源逆变器的零残流全补偿消弧控制方法[8-11]，通过从中性点注入可控电流补偿配电网单相接地故障残流，还可以实现接地残流中的有功分量、无功分量以及谐波分量的实时补偿。文献[12]通过调控中性点接地电阻或电抗调控单相接地故障电流的相位实现单相接地全电流补偿。文献[13]通过有源消弧装置注入给定电流来控制系统零序导纳至正常运行状态进而实现零残流消弧。文献[14]通过整流逆变装置向配电网中性点注入电流进而抑制故障电压，实现单相接地故障消弧。文献[15]提出同时控制注入电流的大小和相位实现故障电流的快速补偿的方法。文献[16]在接地故障发生后，延时控制注入电网电流的大小以增大故障残流，通过精确测量零序电压和各馈线零序电流变化量,实现接地故障的动态感知。以上有源消弧方法以补偿故障全电流为控制目标，通过跟踪测量到的电流来实现零残流全补偿。但由于故障点的残流不能直接测量，因此其控制目标只能通过直接测量的电压和电流值进行推算[17-18]。其他学者提出以控制故障相电压为目标来确定补偿注入电流的电压消弧法。文献[19]提出一种基于中性点电压外环及输出电流内环的有源补偿消弧技术。文献[20]分析低阻接地故障下配电线路自身阻抗对电压消弧方法的影响及解决措施，但分析忽略了三相间耦合作用，没有考虑正、负序阻抗对分析结果的影响[21]。因此，现有不少研究偏向于利用仿真工具来分析消弧方法的有效性[22]，但其无法对消弧方法的改进提供理论指导。

由以上分析可知，现有有源消弧技术多采用单相有源装置控制从消弧线圈实现接地残流的全补偿，未考虑接地故障恢复后全补偿装置如何快速退出运行的问题。为避免接地故障恢复后，系统长期处于谐振状态导致消弧线圈不能及时退出，需要提出一种接地故障恢复的实时检测和判断方法。

本文基于接地残流全补偿理论，通过主动频率注入法测量对地电容大小，分析了零序电压与接地残流的关系，通过交叉结构多广义积分器实现含复杂谐波信号的移相电路，有效实现了对接地残流的实时估计，利用 PI 调节器+多 PR 调节器实现对多谐波电流的控制；采用主动阻尼电流注入法实时检测接地故障的恢复，理论分析了主动阻尼电流数值的计算依据；通过 Simulink 仿真对本文理论分析和提出控制策略的正确性进行验证。

1　理论分析

图 1 所示为 10 kV 配电网单相接地故障残流全补偿装置系统结构示意图，包括主消弧线圈 L_1、注入变压器 T_1 和单相 PWM 逆变器。主消弧线圈采用自动调匝式消弧线圈，由注入变压器和单相 PWM 逆变器组成的 PWM 可控变换器作为从消弧线圈。

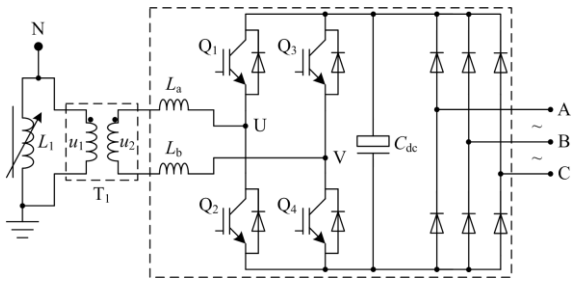


图 1　全补偿装置结构示意图

Fig. 1 Diagram of full compensation device

1.1　残流补偿理论

A 相接地后系统的零序电流通路数学模型如图 2 所示。图中，u_0 为中性点对地电压；u_a 为 A 相相电压；R_d 为 A 相短路故障接地电阻；g_0 为线路对地电导；C_0 为线路对地电容；L_1 为中性点消弧线圈电感；i_d 为接地电流；i_{g0} 为对地电阻电流；i_{c0} 为对地电容电流；i_s 为从消弧线圈等效电流源；i_{0A} 为主消弧线圈补偿电流；i_{0B} 为从消弧线圈补偿电流。

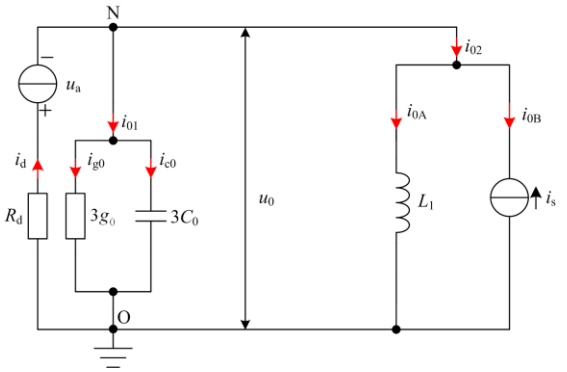


图 2　零序电流通路

Fig. 2 Circuit of zero-sequence current

根据文献[23]，消弧线圈投入前零序电压为

$$\dot{U}_0=-\frac{R_0\dot{U}_a}{R_0+3NR_d(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)} \tag{1}$$

式中：$R_0=1/g_0$ 为线路对地电阻；N 为配电网支路数量。

线路对地电容电流和电阻电流为

$$\begin{cases} i_{c0}=-\dfrac{3N\mathrm{j}\omega R_0C_0\dot{U}_a}{R_0+3NR_d(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)} \\ i_{g0}=-\dfrac{3N\dot{U}_a}{R_0+3NR_d(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)} \end{cases} \tag{2}$$

则故障线路对地电流即系统接地电流为

$$\dot{i}_{\mathrm{d}}=\dot{i}_{\mathrm{c0}}+\dot{i}_{\mathrm{g0}}=\frac{-3N(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)\dot{U}_{\mathrm{a}}}{R_0+3NR_{\mathrm{d}}(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)} \tag{3}$$

消弧线圈投入后，其补偿电流为

$$\dot{i}_{02}=\frac{-(R_0/\mathrm{j}\omega L_1)\dot{U}_{\mathrm{a}}}{R_0+3NR_{\mathrm{d}}(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)}-\dot{i}_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

此时系统接地电流为

$$\dot{i}_{\mathrm{d}}=-\frac{3N+R_0(\mathrm{j}3N\omega C_0+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_1})}{R_0+3NR_{\mathrm{d}}(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)}\dot{U}_{\mathrm{a}}-\dot{i}_{\mathrm{s}} \tag{5}$$

假设 $R_{\mathrm{d}}=0$，有 $U_0=U_{\mathrm{a}}$，为实现接地电流全补偿，则补偿电流应满足

$$\dot{i}_{\mathrm{s}}=-\frac{3N+R_0(\mathrm{j}3N\omega C_0+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_1})}{R_0+3NR_{\mathrm{d}}(1+\mathrm{j}\omega R_0C_0)}\dot{U}_{\mathrm{a}}=\underbrace{\frac{3N\dot{U}_0}{R_0}}_{\dot{i}_{\mathrm{g0}}}+\underbrace{\mathrm{j}3N\omega C_0\dot{U}_0}_{\dot{i}_{\mathrm{c0}}}+\underbrace{\frac{\dot{U}_0}{\mathrm{j}\omega L_1}}_{\dot{i}_{0\mathrm{A}}} \tag{6}$$

式(6)中，$\dot{i}_{0\mathrm{A}}$ 可直接测量，$\dot{i}_{\mathrm{g0}}$ 和 $\dot{i}_{\mathrm{c0}}$ 不可测，因此残流补偿的关键是如何根据零序电压实时估计对地电容和对地电阻的电流。

进一步将从消弧线圈补偿电流写为

$$\dot{i}_{\mathrm{s}}=\frac{3N\dot{U}_0}{R_0}-\mathrm{j}(\frac{1}{\omega L_1}-3N\omega C_0)\dot{U}_0 \tag{7}$$

根据欧姆定理从消弧线圈等效电阻为

$$R_{\mathrm{s}}=\frac{-\dfrac{3N}{R_0}-\mathrm{j}(\dfrac{1}{\omega L_1}-3N\omega C_0)}{\sqrt{\left(\dfrac{3N}{R_0}\right)^2+\left(\dfrac{1}{\omega L_1}-3N\omega C_0\right)^2}} \tag{8}$$

不同情况下消弧线圈的补偿情况如图 3 所示。

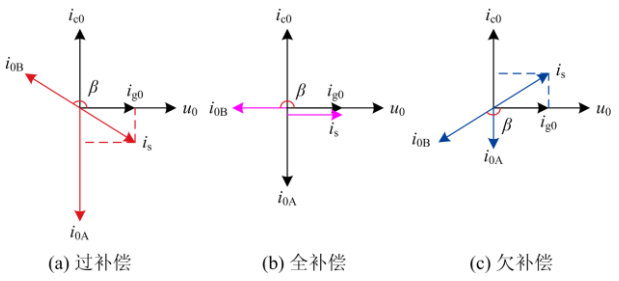


图 3 消弧线圈补偿情况示意图

Fig. 3 Schematic diagram of arc suppression coil compensation

令 $X_{\mathrm{L}}=\omega L_1$，$X_{\mathrm{C}}=1/(3N\omega C_0)$，定义 β 为零序电压与从消弧线圈电流的夹角，分三种情况进行讨论：

1) $X_{\mathrm{L}}<X_{\mathrm{C}}$ 时，$0.5\pi<\beta<\pi$，系统处于过补偿状态，从消弧线圈表征为负电阻和电容串联阻抗特性，如图 3(a)所示；

2) $X_{\mathrm{L}}=X_{\mathrm{C}}$ 时，$\beta=\pi$，系统处于全补偿状态，从消弧线圈表征为负电阻特性，如图 3(b)所示；

3) $X_{\mathrm{L}}>X_{\mathrm{C}}$ 时，$-\pi<\beta<-0.5\pi$，系统处于欠补偿状态，从消弧线圈表征为负电阻和电感串联阻抗特性，如图 3(c)所示。

1.2 残流估计理论

补偿电流主要包括两部分：线路对地电容电流的估计和线路对地电阻电流的估计。

(1) 线路对地电容电流估计

采用主动频率信号注入法可测量接地电容，通过可控 PWM 变换器向中性点注入不同频率的电流，通过检测零序电压的最大值，根据 LC 并联谐振的原理，可估算接地电容的大小，接地电容的计算公式为

$$C_0=\frac{1}{(f_{\mathrm{res}}\cdot 2\pi)^2\cdot L_1\cdot N} \tag{9}$$

式中，f_{res} 为注入电流信号的频率。

(2) 线路接地电阻电流估计

在实际工程应用中，线路接地电阻电流估计可根据阻尼率预估得到。阻尼率计算公式为

$$d=\frac{g_{\mathrm{L}}+3Ng_0}{3N\omega C_0}=\frac{\dot{i}_{\mathrm{gL}}+\dot{i}_{\mathrm{g0}}}{\dot{i}_{\mathrm{c0}}}=d_{\mathrm{gL}}+d_{\mathrm{g0}} \tag{10}$$

阻尼率一般取 10%，d_{g0} 可取 5%，由此可得接地电阻的估计值为

$$R_0=\frac{1}{g_0}=\frac{1}{d_{\mathrm{g0}}\omega C_0} \tag{11}$$

线路对地电阻电流计算公式为

$$\dot{i}_{\mathrm{g0}}=3N\cdot\frac{\dot{U}_0}{R_0}=g_0 3N\dot{U}_0=d_{\mathrm{g0}}\omega C_0 3N\dot{U}_0 \tag{12}$$

由于电容电流超前零序电压 90°，获知电容值后在实际计算时需要对零序电压进行移相处理；设注入变压器变比为 K，则可得 PWM 可控变换器的参考电流的估计框图如图 4 所示。

图 4 所示的移相电路采用广义积分器(SOGI)实现，其输出 w 与输入 x 的传递函数为

$$H_w(s)=\frac{W(s)}{X(s)}=-\frac{\lambda\omega_{\mathrm{in}}^2}{s^2+\lambda\omega_{\mathrm{in}}s+\omega_{\mathrm{in}}^2} \tag{13}$$

式中：ω_{in} 为输入信号的角频率；λ 为阻尼系数。

式(13)的幅值和相位分别为

$$\begin{cases} |H_w(s)| = \dfrac{\lambda\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+(\lambda\omega_0\omega)^2}} \\ \angle H_w(s) = \tan^{-1}\left(\dfrac{\lambda\omega_0\omega}{\omega_0^2-\omega^2}\right) \end{cases} \tag{14}$$

由式(14)可知，当 $\omega=\omega_0$ 时，所述移相电路的增益为 1，相位为 $\pi/2$，可对频率为 ω_0 的正弦信号实现超前 90°；当频率大于谐振频率时以 20 dB 速率衰减，因此可用于电容电流估计的移相电路。

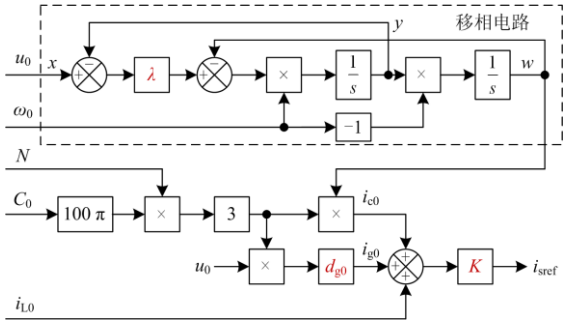


图 4 PWM 可控变换器参考电流计算框图

Fig. 4 Reference current calculation block diagram of PWM-controlled converter

2 控制实现

2.1 对地电容参数的估计

采用主动信号注入法测量接地电容的大小，其对应的振荡频率检测电路如图 5 所示。

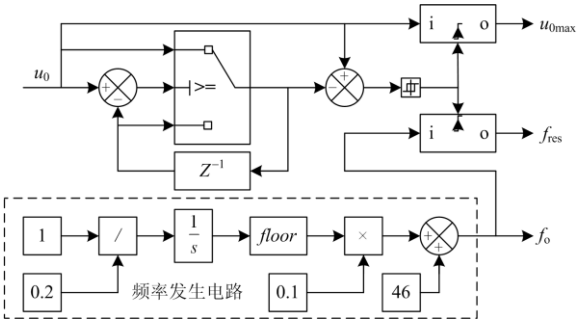


图 5 振荡频率检测电路

Fig. 5 Oscillation frequency detecting circuit

如图 5 所示，频率发生电路控制注入电流信号的频率，其中注入电流信号的频率变化步长为 0.1 Hz/s，持续时间 0.2 s；通过零序电压最大值锁存电路可得零序电压最大时对应的即为 LC 的谐振频率值。

电网电压含有非理想的谐波成分，因此图 5 的关键是如何从含有丰富谐波成分的零序电压的信号中提取特定的频率信号。

利用广义积分器(SOGI)可实现对特定频率信号的提取[24]，但单一 SOGI 在对含多频率信号源的某特定频率信号提取时效果不佳。本文采用基于多个 SOGI 的选频器实现特定频率信号的检测，其结构框图如图 6 所示。由图 6 可知，采用多个 SOGI 组成交叉解耦结构，考虑到电网基波以及电网中比较明显的 5、7、11 次谐波，采用了 5 个 SOGI 构成本应用中的选频器，用来提取注入的频率信号。

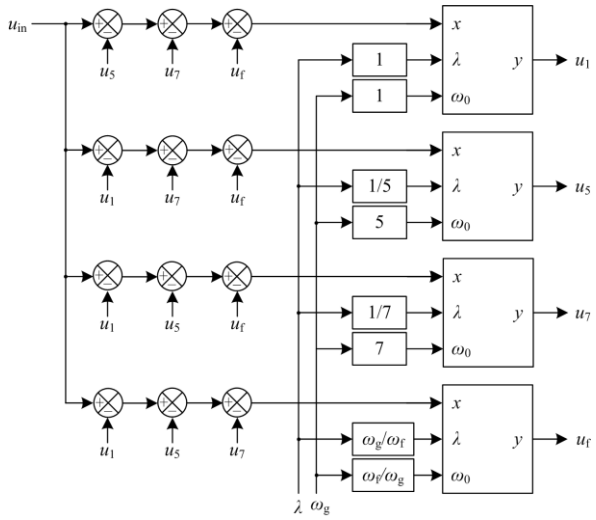


图 6 基于 M-SOGI 的选频器结构框图

Fig. 6 Structure of frequency selector based on M-ISOGI

2.2 故障恢复控制

假设主消弧线圈投入后系统处于过补偿状态，则满足接地电流全补偿的系统等效示意图如图 7 所示。

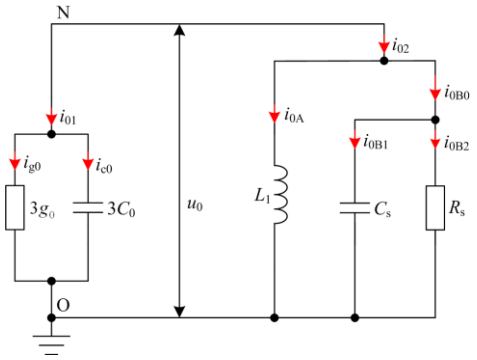


图 7 接地故障消失后系统等效电路示意图

Fig. 7 Equivalent circuit diagram after the earth fault disappears

图中 R_s 和 C_s 满足：

$$\begin{cases} R_s = -\dfrac{1}{3g_0} \\ C_s = \dfrac{1}{\omega_g^2 L_1} - 3C_0 \end{cases} \tag{15}$$

式中，ω_g 为电网的角频率。

接地电流全补偿状态等效系统发生 LC 并联谐振，谐振频率为电网角频率。

令 $L=L_1$，$C=3C_0+C_s$，$R=R_s//1/(3g_0)$，根据二阶 RLC 并联电路建立系统微分方程为

$$LC\frac{\mathrm{d}^2u_0(t)}{\mathrm{d}t^2}+\frac{L}{R}\frac{\mathrm{d}u_0(t)}{\mathrm{d}t}+u_0(t)=0 \tag{16}$$

系统的特征根为

$$s_{1,2}=-\frac{1}{2RC}\pm\sqrt{(\frac{1}{2RC})^2-\frac{1}{LC}}=-\alpha\pm\sqrt{\alpha^2-\omega_0^2} \tag{17}$$

其中：

$$\alpha=\frac{1}{2RC},\ \omega_0=\sqrt{\frac{1}{LC}}=\omega_g。$$

式中，α 定义为电路的阻尼系数；ω_0 为电路的谐振角频率。

一般情况下 R 很大，系统特征根为共轭复根，电路处于欠阻尼状态，则可得系统的响应为

$$u_0(t)=Ae^{-\alpha t}\cos(\omega_d t+\varphi) \tag{18}$$

式中：A 为零序电压 u_0 的幅值；φ 为零序电压 u_0 的相位；其中 A 和 φ 需要根据接地恢复时刻零序电压、电感和电容的数值进行计算；$\omega_d=\sqrt{\omega_0^2-\alpha^2}$ 为零序电压 u_0 的角频率。

在全补偿状态下，$R=\infty$，$\alpha=0$，$\omega_d=\omega_g$，由式(18)可知，系统零序电压将以电网频率做等幅振荡；而实际情况下，R 不可能无穷大，零序电压为幅值按指数规律衰减的正弦信号，振荡频率小于电网频率。

假设主动阻尼电流 i_{dp} 注入后，在 t_c 时间后，零序电压幅值下降到原来的 Δ 倍，则可得

$$t_c=-\frac{\ln\Delta}{\alpha}=-2RC\ln\Delta \tag{19}$$

进一步可得

$$\begin{cases}R=-\dfrac{t_c}{2(3C_0+C_s)\ln\Delta}=-\dfrac{\omega_g^2L_1t_c}{2\ln\Delta}\\ R_s=-\dfrac{1}{\dfrac{2\ln\Delta}{\omega_g^2L_1t_c}+3g_0}\end{cases} \tag{20}$$

由式(20)可知，在接地故障恢复后，需要向系统额外注入正阻性电流即有功电流，才能使得零序电压幅值处于衰减下降状态。

通过周期性地向系统注入有功电流，根据零序电压的变化特点可实时判断接地故障是否消失，确保消弧线圈和逆变器及时退出运行。

2.3 PWM 可控变换器控制

PWM 可控变换器采用闭环控制[25]，采用 PI+PR 复合调节器，考虑到 PWM 可控变换器需要补偿的电流信号中含有谐波分量，主要以 5 次、7 次为主，因此采用了针对 5 次和 7 次谐波的 PR 调节器，所述 PWM 可控变换器的电流控制策略如图 8 所示。

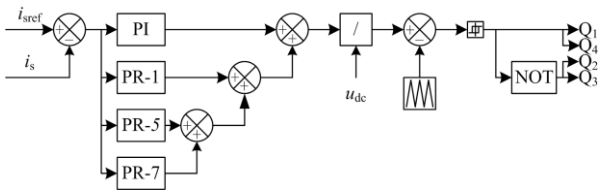


图 8 PWM 可控变换器控制框图

Fig. 8 Control diagram of PWM-controlled converter

图 8 中 PI 调节器的表达式为

$$G_{PI}(s)=k_{p0}+\frac{k_{i0}}{s} \tag{21}$$

式中：k_{p0} 为 PI 调节器的比例系数；k_{i0} 为 PI 调节器的积分系数。

参考文献[26]，PI 调节器参数按照式(22)设计。

$$\begin{cases}k_{p0}=\dfrac{2L_a+L_{T12}}{3T_s}\\ k_{i0}=\dfrac{2L_a+L_{T12}}{20T_s^2}\end{cases} \tag{22}$$

式中：L_a 为 PWM 逆变器的电感；L_{T12} 为注入变压器副边绕组电感；T_s 为 PWM 逆变器的开关周期。

由于 PR 调节器带宽较小，对电网频率波动适应性较差，因此在实际工程应用中多采用准 PR 调节器，如式(23)所示。

$$G_{PR}(s)=\sum_{n=1,5,7}[k_{pn}+\frac{2k_{in}\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+(n\omega_g)^2}] \tag{23}$$

式中：k_{pn} 为 n 次 PR 调节器的比例系数；k_{in} 为 n 次 PR 调节器的积分系数；ω_c 为截止频率。

其中准 PR 调节器参数 k_{pn} 和 k_{in} 参考式(24)设计。

$$\begin{cases}k_{pn}=k_{p0}=\dfrac{2L_a+L_{T12}}{3T_s}\\ k_{in}=nk_{i0}=\dfrac{n(2L_a+L_{T12})}{20T_s^2}\end{cases} \tag{24}$$

截止频率 ω_c 影响 PR 控制器的带宽，一般考虑电网基频正常波动为±0.5 Hz，参考文献[27]，可得 $\omega_c=0.2$ rad/s。

3 仿真分析

在 Matlab 中建立 10 kV 配电网线路带残流全补偿装置的系统仿真模型，系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数表

Table 1 Parameters of system

参数	数值	参数	数值
U_e/kV	10	K	10 kV/450 V
L_a/mH	1	C_{dc}/μF	4 000
d	10%	d_{g0}	5%
C_0/μF	3.68	L_1/mH	291.6
R_0/Ω	17 320	N	3

3.1 对地电容参数检测

系统仿真设置如下：初始设定注入信号的频率为 49 Hz，每隔 0.2 s，注入信号频率增加 0.1 Hz，仿真波形如图 9 所示。

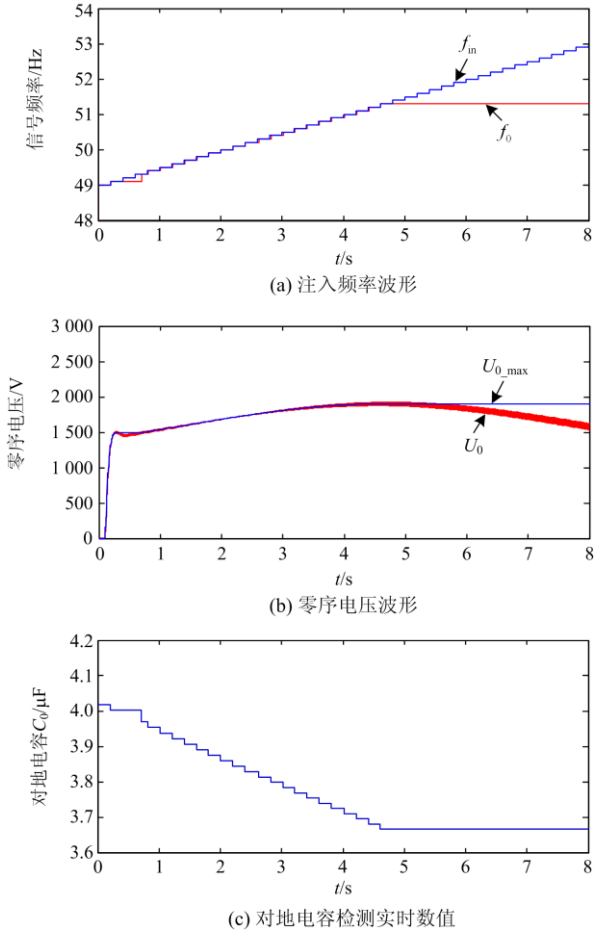


图 9 对地电容检测仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of capacitance to ground

由图 9 可知，零序电压最大值对应的谐振频率为 51.3 Hz，计算出来的电容值为 3.666 μF，误差为 0.37%，验证了所提对地电容检测方法的有效性。

3.2 残流补偿控制仿真

系统仿真设置如下：t = 0.12 s，A 相发生接地故障，接地电阻 R_d = 5 Ω；t = 0.22 s，主消弧线圈投入；t = 0.52 s，从消弧线圈投入；t = 0.8 s，主动阻尼电流注入，幅值 2 A，周期 0.2 s，持续时间 0.1 s；t = 1.1 s，接地故障消失。仿真结果如图 10 所示。

由图 10 所示仿真结果可知，接地故障发生后短路电流峰值约 85 A；主消弧线圈投入后，经过 5~6 个周期过渡时间，短路电流峰值下降为 10 A；由波形可见，所述算法对短路电流估计准确，误差在 5% 以内；从消弧线圈投入运行以后，短路电流峰值下降为 0.7 A，表明所述残流控制策略的有效性。

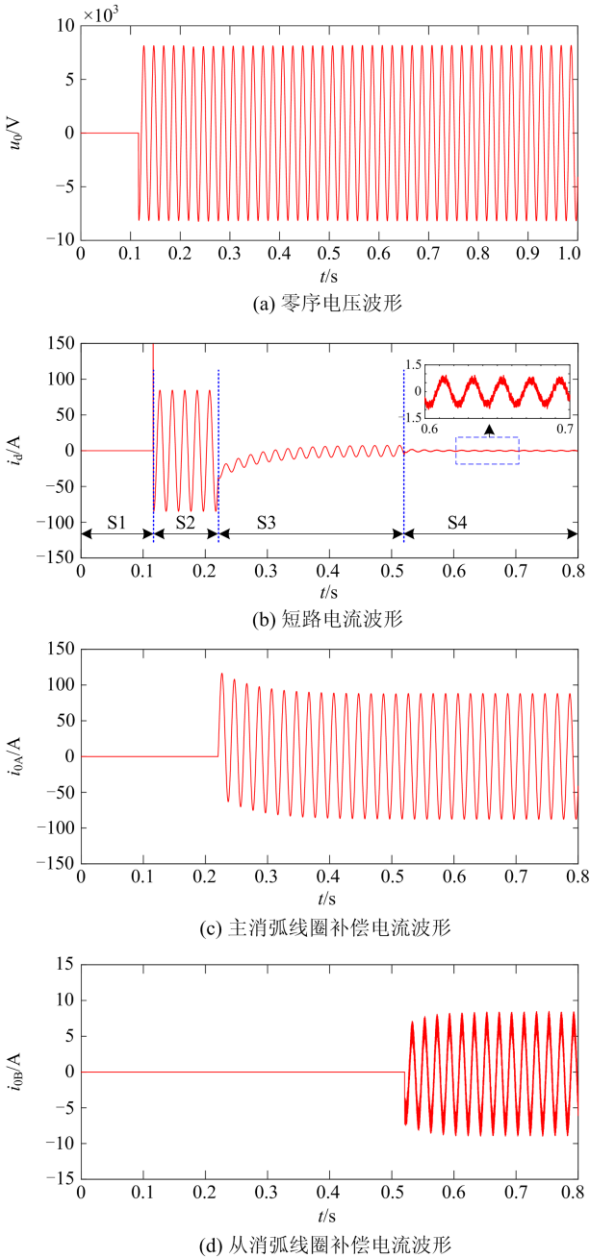


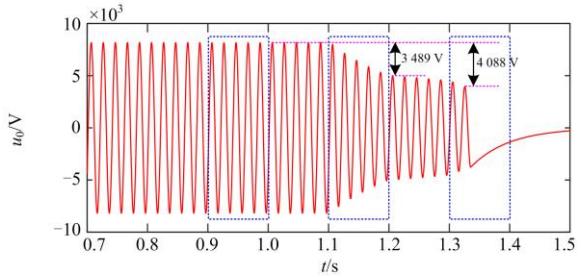
图 10 残流补偿控制仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of residual-current control

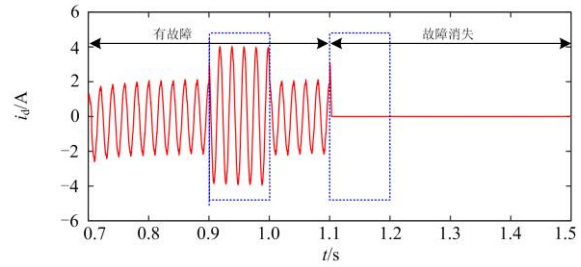
3.3 接地故障恢复检测仿真

t = 0.8 s，从消弧线圈向系统注入周期性阻尼电流，周期 0.2 ms，持续时间 0.1 s，等效阻尼电阻为 3 242 Ω；t = 1.1 s，接地故障消失。仿真结果如图 11 和图 12 所示。

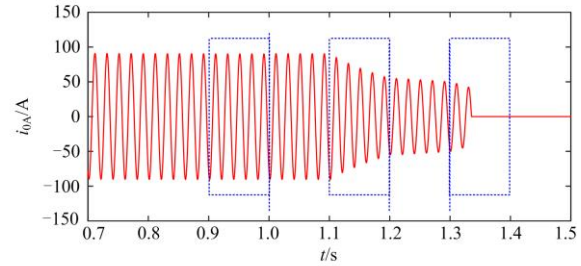
由图 11 所示的仿真波形可知，在故障消失前向系统注入阻尼电流，零序电压无变化；接地故障消失后，系统短路电流立即消失，在阻尼电流的作用下，零序电压按指数曲线下降，在 0.1 s 时间内，零



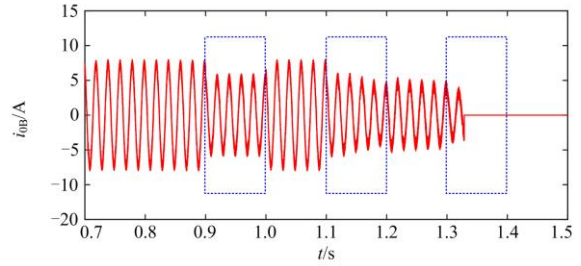
(a) 零序电压波形



(b) 短路电流波形



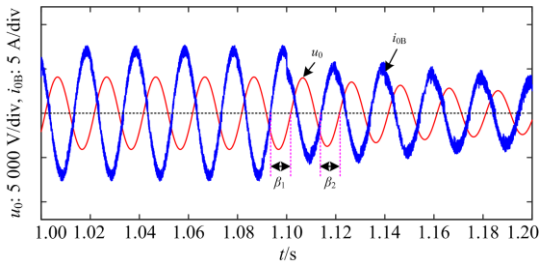
(c) 主消弧线圈补偿电流波形



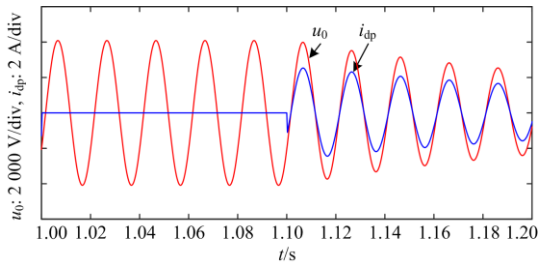
(d) 从消弧线圈补偿电流波形

图 11 主动阻尼电流注入控制仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms of active damping current injection control



(a) u_0和i_{0B}波形



(b) u_0和i_{dp}波形

图 12 零序电压、从消弧线圈补偿电流和主动阻尼电流波形

Fig. 12 Waveforms of zero-sequence voltage, compensating current of slave arc suppression coil and active damping current

序电压下降了 3 489 V，下降比例 42.4%，与理论分析数值相差 7.3%；随着零序电压的下降，由图 11(c)和图 11(d)可知，主消弧线圈和从消弧线圈的电流均呈下降趋势，与理论分析一致。

图 12 给出了零序电压和从消弧线圈以及主动阻尼电流的仿真波形。由图 12(a)可知，在 t = 1.0 s 时刻前后，从消弧线圈补偿电流 i_{0B} 超前零序电压角度分别为 β_1 和 β_2，且均在 π/2~π 范围内，表明从消弧线圈补偿电流 i_{0B} 为容性和负电阻特性；此外由 $\beta_1>\beta_2$ 可知，注入的主动阻尼电阻为正电阻特性；图 12(b)更进一步表明注入的主动阻尼电流为正电阻特性；仿真结果验证了理论分析的正确性。

4 结论

本文提出一种低压配电网单相接地故障的残流全补偿控制方法。分析了残流补偿基本理论，提出对地电容电流检测的实现方法，进而实现单相接地故障的残流实时估计；利用阻尼电流注入法实现单相接地故障恢复的实时检测和消弧线圈的及时退出；采用“PI+多 PR 调节器”对单相有源全控桥进行控制，实现了接地残流的有效补偿。对所述理论和控制方法进行了仿真验证，仿真结果表明，所提残流全补偿控制方法能够实现配电网接地残流的实时补偿，具有一定的实用性。

参考文献

[1] 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.

[2] 龙茹悦，黄纯，汤涛，等. 一种谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制，2019, 47(21): 21-29.
LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.

[3] 袁超，薛永端，梅睿，等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制，2020, 48(3): 130-137.
YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.

[4] 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.

[5] 卫晓辉，邵文权，程远，等. 配电网单相接地故障有源消弧技术综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 58-65.
WEI Xiaohui, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Review of single-phase grounding fault active arc-suppression technologies in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 58-65.

[6] 孔宁，尹忠东，杨坡，等. 基于 PWM 可控电抗器的自调谐消弧线圈的研究[J]. 电力系统保护与控制，2010, 38(23): 132-136, 140.
KONG Ning, YIN Zhongdong, YANG Po, et al. Study on automatic tuning arc suppression coil based on PWM-controlled reactor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 132-136, 140.

[7] 艾绍贵，李秀广，黎炜，等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 178-184.
AI Shaogui, LI Xiuguang, LI Wei, et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 178-184.

[8] WINTER K M. Swedish distribution networks-a new method for earth fault protection in cable and overhead systems[C] // 1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, March 30-April 2, 1993, York, UK: 268-270.

[9] WANG Wen, ZENG Xiangjun, YAN Lingjie, et al. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4561-4570.

[10] 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 Socitety, 2015, 30(10): 311-318.

[11] 曲轶龙，董一脉，谭伟璞，等. 基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 29-33.
QU Yilong, DONG Yimai, TAN Weipu, et al. Research on new type arc-suppression coil based on single-phase active power filter technology[J]. Relay, 2007, 35(3): 29-33.

[12] 唐轶，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.

[13] 贾晨曦，杨龙月，杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制，2015, 43(9): 145-154.
JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of key technologies on full current compensation arc suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 145-154.

[14] 张健，贺蕾思思，陈锐，等. 基于寻优控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 广东电力，2017, 30(2): 129-136.
ZHANG Jian, HE Leisisi, CHEN Rui, et al. Active arc suppression method for single-phase grounding fault of power distribution network based on self-optimized control[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 129-136.

[15] 李晓波，蒋峰景，李康，等. 采用改进有源补偿技术的中性点电压柔性控制方法[J]. 电力系统自动化，2016, 40(24): 111-117.
LI Xiaobo, JIANG Fengjing, LI Kang, et al. Flexible

control method of neutral point voltage using improved active compensation technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 111-117.

[16] 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.

[17] 郭谋发, 游建章, 林先辉, 等. 适应线路参数及负载变化的配电网柔性优化消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 138-145.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, LIN Xianhui, et al. Flexible arc-suppression optimization method for distribution network adaptable to variation of line parameters and load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 138-145.

[18] 周兴达, 陆帅, 陈杨明, 等. 基于 SVG 两相电流注入的配电网单相接地故障消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 142-149.
ZHOU Xingda, LU Shuai, CHEN Yangming, et al. Single-phase-to-ground fault arc-extinguishing method for distribution network based on SVG two-phase current injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 142-149.

[19] 陈锐, 周丰, 翁洪杰, 等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 128-133.
CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Active arc-suppression method based on double closed-loop control under single-phase grounding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 128-133.

[20] 张毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 低阻接地故障有源电压消弧算法性能分析和改进[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 314-321.
ZHANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Performance analysis and improvement of active voltage arc-suppression algorithm about low resistance grounding fault[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 314-321.

[21] 唐金锐, 杨晨, 程利军. 配电网馈线零序电流随过补偿度动态调节的变化特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 125-132.
TANG Jinrui, YANG Chen, CHENG Lijun. Analysis on zero-sequence current variation characteristic for feeders of distribution network at different residual current compensation factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 125-132.

[22] 余斌, 尹项根, 朱维钧, 等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 72-79.
YU Bin, YIN Xianggen, ZHU Weijun, et al. Grounding fault analysis and protection scheme study for composite grounding arc-suppression mode[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 72-79.

[23] XIAO Y, OUYANG J, XIONG X, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-00.

[24] ZHANG Jianwen, WANG Haisong, WANG Han, et al. Backup control of wind power generation system based on voltage-sensorless and LCL active damping scheme[J]. Wind Engineering, 2015, 39(1): 65-82.

[25] 宋绍剑, 阳喜, 刘斌, 等. 基于电网阻抗的并网逆变器准比例谐振控制[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 90-96.
SONG Shaojian, YANG Xi, LIU Bin, et al. Quasi-proportional resonance control of grid-connected inverter based on grid impedance[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 90-96.

[26] 王海松, 王晗, 张建文, 等. LCL 型并网逆变器的分裂电容无源阻尼控制[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 895-902.
WANG Haisong, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Split-capacitor passive damping control for LCL grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 895-902.

[27] 王晗, 窦真兰, 张建文, 等. 感应发电机全功率风电变换器的改进 PR 控制[J]. 太阳能学报, 2014, 35(11): 2257-2263.
WANG Han, DOU Zhenlan, ZHANG Jianwen, et al. An improved proportional resonant control strategy for full-scale wind power converter with induction generator[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(11): 2257-2263.

收稿日期：2020-11-05； 修回日期：2020-12-16

作者简介：

王 鹏(1984—)，男，博士，高级工程师，研究方向为配电网运行技术；E-mail: w-fsfe@163.com

冯 光(1984—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为配电网运行技术；E-mail: qingzhu1@163.com

王 晗(1982—)，男，通信作者，博士，助理研究员，研究方向为电力电子化电力系统装置控制及运行技术。E-mail: wanghansjtu@sjtu.edu.cn

（编辑 魏小丽）