

DOI: 10.7667/PSPC171503

基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法

彭沙沙^{1,2}, 曾祥君¹, 喻琨¹, 王文¹, 蔡演存¹

(1. 清洁能源电力技术协同创新中心(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114;

2. 国网湖南省电力有限公司检修公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对中性点非有效接地配电网中存在的单相接地故障消弧问题, 提出了一种基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法。该方法通过向配电网中性点注入工频电流来达到单相接地故障消弧目的, 确保电网安全稳定运行。注入电流的参考值由二次注入特定电流的方法得到, 将注入电流偏差信号通过比例谐振控制器, 驱动逆变器开关管产生逆变电流, 经滤波电路后注入电网中性点, 抑制故障点电压和电流到零。仿真及 10 kV 接地故障实验表明, 该方法响应速度快、灵敏度高, 能补偿配电网接地故障电流的无功电流分量、有功电流分量及谐波分量, 实现瞬时接地故障快速可靠灭弧。

关键词: 二次注入; 比例谐振; 单相接地故障; 消弧

Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection

PENG Shasha^{1,2}, ZENG Xiangjun¹, YU Kun¹, WANG Wen¹, CAI Yancun¹

(1. Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Electric Power Technology (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Maintenance Company, Changsha 410004, China)

Abstract: To solve the problem of arc-suppression of single-phase grounding fault in neutral non-effectively grounded distribution network, an active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection is proposed in this paper. By means of injecting current with power frequency into the neutral point of the network, the purpose of arc suppression of single-phase grounding fault can be achieved, which ensures the safe and stable operation of the power grid. The reference value of the injection current is obtained by injecting a specific current to the system twice. Injection current deviation signal is put into proportional resonant controller to drive inverter switch to generate inverter current. And then, the current is injected into the neutral point of grid through the filter circuit, which can suppress the fault voltage and current to zero. Simulation and 10 kV grounding fault experiments show that the method has fast response and high sensitivity, and can compensate the reactive current component, active current component and harmonic components of the grounding fault current, which realizes fast and reliable arc extinguishing of ground fault.

This work is supported by Smart Grid Technology and Equipment Major Project in National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W and No. 52170217000S), and National Natural Science Foundation of China (No. 51425701 and No. 51737002) and Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company Limited (No. 5216A01700AH).

Key words: secondary injection; proportional resonance; single phase grounding fault; arc-suppression

0 引言

电力系统作为一个非线性、大规模系统, 其线

路复杂, 运行环境多变, 各类事故频发, 其中又以单相接地故障最为常见, 约占 70%。目前我国配电网广泛采用中性点经消弧线圈接地、经小电阻接地等中性点非有效接地运行方式来限制接地故障电流。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

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目(52094017000W, 52170217000S); 国家自然科学基金项目(51425701, 51737002); 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A01700AH)

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, 且对于绝缘故障引起的间歇性弧光接地故障无能为力, 其抑制效果有限, 并易产生弧光过电压, 最大可达额定电压的 7 倍, 烧毁高压电器设备, 甚至引发火烧连营事故, 造成大面积停电^[1]。

当前配电网故障消弧一般采用随调式消弧线圈来实现, 该装置通过调节消弧线圈触头以动态改变接入容量来进行电容电流补偿, 在调节精度和响应速度等方面难以满足快速可靠熄弧的要求。因此, 随着消弧技术的深入研究, 国内外学者提出了接地电流全补偿的概念, 并根据补偿方式分为无源基波电流全补偿和有源全电流补偿两类。无源基波电流全补偿即在配电网接入偏置元件, 实现故障基波电流的全补偿, 如河海大学马宏忠教授课题组提出的中性点电阻接地超前相接电感、中性点电抗接地滞后相接电容或超前相接电感的方法, 所提方法是建立在能精确测量电网对地电容及泄露电阻以及故障相已知的条件下, 但是未提与之相适应的电网对地绝缘参数测量和选相方法, 且需同时调节中性点接地阻抗和偏置元件的阻抗值, 操作相对复杂, 实际应用受到限制^[2]。有源全电流补偿即利用有源逆变器从中性点注入可控零序电流的方式补偿电容电流、有功电流和谐波电流, 实现接地故障的零残流。瑞典 Swedish Neutral 公司开发的 GFN 接地故障综合保护装置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, 且成本高昂, 一套装置的售价达 400 万元; 华北电力大学杨以涵教授课题组提出的基于单相有源滤波技术的新型主从式消弧线圈, 其故障谐波电流检测理论尚不够完善, 未应用于工业^[4-5]。

针对上述配电网消弧方法存在的问题, 作者在前期柔性接地技术的研究基础上^[6-9], 提出了一种基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法, 该方法能解决接地故障电流难以快速可靠抑制的问题。在配电网单相接地故障发生时, 迅速向电网中性点注入参考电流, 钳制故障点电压到零, 补偿配电网接地故障的无功电流分量、有功电流分量及谐波分量, 快速可靠地实现消弧。

1 二次注入电流法

基于 PWM 有源逆变器向配电网中性点注入一工频电流, 改变该电流的幅值和相位可实现对零序电压的柔性调控。通过对零序电压的调控, 实现对中性点位移过电压的控制, 破坏电弧重燃条件, 实现故障消弧目的。

图 1 所示的单相接地故障有源电压消弧示意图中, E_A 、 E_B 、 E_C 分别为配电网电源电动势, r_A 、 r_B 、 r_C 为配电网有功泄露电阻, C_A 、 C_B 、 C_C 为配电网对地电容, R_f 为接地故障过渡电阻, U_N 为中性点电压, I_i 为通过有源电压消弧装置注入的电流, C_f 、 L_f 为滤波电路的电容和电感, C_{dc} 为直流侧电容, L_p 为消弧线圈。

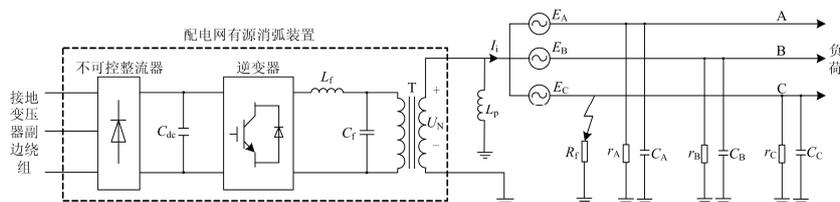


图 1 配电网单相接地故障有源电压消弧示意图

Fig. 1 Schematic diagram of active arc-suppression under a single-phase grounding fault in distribution network

针对图 1 所示的配电网, 建立图 2 所示的等效示意图。

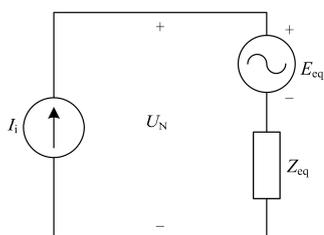


图 2 配电网等效示意图

Fig. 2 Equivalent diagram of distribution network

其中:

$$E_{eq} = -\frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C};$$

$$Y_A = j\omega C_A + \frac{1}{r_A}; \quad Y_B = j\omega C_B + \frac{1}{r_B};$$

$$Y_C = j\omega C_C + \frac{1}{r_C}; \quad Z_{eq} = \frac{1}{Y_A + Y_B + Y_C} + j\omega L_p.$$

在图 2 中, 由基尔霍夫电压定律可知:

$$U_N = E_{eq} + I_i Z_{eq} \quad (1)$$

通过有源电压消弧装置分两次将相位相同, 幅值不同的工频电流 I_{i1} 、 I_{i2} 注入中性点, 分别测量相应的中性点电压 U_{N1} 、 U_{N2} 。将 I_{i1} 和 I_{i2} 代入式(1), 可知:

$$\begin{cases} U_{N1} = E_{eq} + I_{i1}Z_{eq} \\ U_{N2} = E_{eq} + I_{i2}Z_{eq} \end{cases} \quad (2)$$

进而可知:

$$\begin{cases} Z_{eq} = \frac{U_{N1} - U_{N2}}{I_{i1} - I_{i2}} = \frac{\Delta U_N}{\Delta I_i} \\ E_{eq} = \frac{U_{N2}I_{i1} - U_{N1}I_{i2}}{\Delta I_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta U_N = U_{N1} - U_{N2}$; $\Delta I_i = I_{i1} - I_{i2}$ 。

发生单相接地故障时(假设故障发生在 C 相), 接地故障过渡电阻为 R_f , 此时 C 相总导纳为 Y'_C , 则故障发生后, 图 2 所示的系统戴维宁等效电路中:

$$E'_{eq} = -\frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y'_C}{Y_A + Y_B + Y'_C};$$

$$Z'_{eq} = \frac{1}{Y_A + Y_B + Y'_C} + j\omega L_p;$$

$$Y'_C = j\omega C_C + \frac{1}{r_c} + \frac{1}{R_f}.$$

考虑注入电流后, 则式(1)等效为

$$U'_N = E'_{eq} + I_i Z'_{eq} \quad (4)$$

有源电压消弧装置通过中性点注入电流强制故障相电压为零, 以实现故障消弧的目的, 此时控制目标为 $U_N = -E_C$, 且 $E_{eq} = E'_{eq}$, $Z_{eq} = Z'_{eq}$, 此时的注入电流值即为参考电流, 由式(4)可知

$$I_{iC}^* = \frac{E_C - E'_{eq}}{Z'_{eq}} = \frac{U_{N1}I_{i2} - U_{N2}I_{i1} - E_C \Delta I_i}{\Delta U_N} \quad (5)$$

同理, 当故障发生在 A、B 相时, 其注入电流的参考值分别为

$$I_{iA}^* = \frac{U_{N1}I_{i2} - U_{N2}I_{i1} - E_A \Delta I_i}{\Delta U_N} \quad (6)$$

$$I_{iB}^* = \frac{U_{N1}I_{i2} - U_{N2}I_{i1} - E_B \Delta I_i}{\Delta U_N} \quad (7)$$

与传统电容电流的测量方式相比, 二次注入法仅需向中性点注入两次工频电流, 不需要改变频率即可操作测量; 无需测量配电网对地参数, 同时也不需要考虑配电网三相不平衡度的影响, 精确度较高; 该方法在二次侧注入电流, 工作环境安全, 操作简便; 只需在故障发生前即可测得三相线路分别对应的注入电流的参考值, 在发生故障后仅仅需要

注入对应的电流即可实现单相接地故障消弧的任务, 反应迅速, 响应时间短。

2 电流闭环控制方法

为了实现注入电流快速、精准的控制, 论文采用基于比例谐振控制器的电流闭环控制方法。考虑到在谐振频率处, 比例谐振控制器的增益无穷大, 但在非谐振频率时增益下降明显, 在现实情况中元件的参数不能准确测量以及数字控制器的精度制约, 谐振频率处增益不会达到无穷大^[10-12]。所以在设计比例谐振控制器时要考虑实际谐振频率与理想谐振的偏差, 综合上述分析取传递函数为

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (8)$$

式中: k_p 和 k_r 分别为比例系数和共振系数; ω_c 为截止频率; ω 为谐振频率。输出电流偏差值经过比例谐振控制器后得到调制波 U_r , 如下式所示。

$$U_r = (k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2})(I^* - I) \quad (9)$$

式中: I^* 为注入中性点的参考电流; I 为中性点实际电流, 在得到调制波后, 将其与三角载波比较生成逆变器开关管驱动脉冲, 以控制有源电压消弧装置输出参考电流值, 注入配电网中性点。

图 3 为系统控制框图, 该闭环控制系统的控制对象为有源电压消弧装置输出电流, 其参考值由二次注入电流法获得。 G_{INV} 为逆变器的传递函数, G_{PR} 为比例谐振控制器传递函数, G_0 为输出电压与注入电流之间传递函数, G_s 为注入电流与中性点电压之间的传递函数。则该控制系统的传递函数为

$$G_s(s) = \frac{G_{PR} G_{INV} G_0 G_s}{1 + G_{PR} G_{INV} G_0} \quad (10)$$

其中:

$$G_{INV} = K_{INV};$$

$$G_0 = \frac{R_s R_f C_s s + R_f + R_s}{L_f C_f G_s R_f R_s s^2 + L_f R_s R_f C_s s^2 + L_f (R_f + R_s) s + R_f R_s},$$

$$R_s = \frac{r_B r_C + r_A r_C + r_A r_B}{n^2 (r_A + r_B + r_C)}; C_s = \frac{(C_A + C_B + C_C)}{n^2}.$$

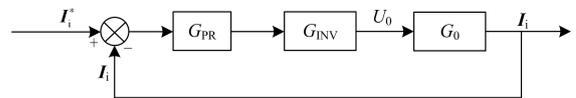


图 3 电流闭环控制框图

Fig. 3 Structure diagram of current closed-loop control

3 控制器参数设计

为了确定合适的比例谐振系数, 提高控制系统

的稳定性, 论文将运用根轨迹法和劳斯(Routh)判据设计比例谐振控制器参数, 并运用波特图讨论参数选值对系统稳定性的影响^[13-14]。

3.1 控制器比例系数设计

在设计控制器比例系数 k_p 时, 将比例谐振控制器等效为比例控制器, 并通过根轨迹法分析控制系统开环传递函数来确定 k_p 的取值。

根据表 1 的数据可得到电流开环传递函数:

$$G_2(s) = G_{PR} G_{INV} G_0 = \frac{k_p K_{INV} (R_s R_f C_s s + R_f + R_s)}{2L_f R_s R_f (C_s + C_f) s^2 + L_f (R_s + R_f) s + R_s R_f} \quad (11)$$

表 1 控制系统参数

Table 1 Parameters of control system

参数名称	单位	数值
C_s	μF	8.36
R_s	$\text{k}\Omega$	12.7
R_f	$\text{k}\Omega$	1
L_f	mH	0.5
C_f	μF	10
K_{INV}		25.98
n		26.25

图 4 为在 Matlab 中绘制系统的闭环根轨迹。该闭环系统存在两条根轨迹, 虚线所示的根轨迹起于正半虚轴的极点, 终于开环零点; 实线所示的根轨迹起于负半虚轴的极点, 终止于无穷远处。在工程计算中, 采用主导极点代替系统全部闭环极点来估算系统性能指标的方法, 本文选取 a 点为闭环主导极点, 此时的比例系数 $k_p=1.11$ 。

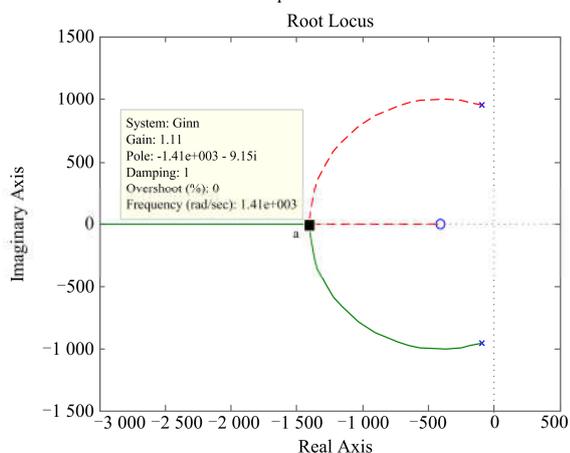


图 4 系统闭环根轨迹图

Fig. 4 Root locus diagram of closed-loop system

3.2 控制器积分系数设计

在确定系统的比例系数 k_p 后, 可根据劳斯判据

确定控制器的积分系数。将控制系统参数代入电流闭环特征方程 $1 + G_2(s) = 0$ 可得:

$$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0 \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} A &= 2L_f R_s R_f (C_s + C_f); \\ B &= k_p K_{INV} R_s R_f C_s + L_f (R_s + R_f) + 4\omega_c L_f R_s R_f (C_s + C_f); \\ C &= k_p K_{INV} (R_s + R_f) + 2\omega_c L_f (R_s + R_f) + \\ & 2K_{INV} \omega_c (k_p + k_r) R_s R_f C_s + R_s R_f + 2\omega_c^2 L_f R_s R_f (C_s + C_f); \\ D &= k_p K_{INV} R_s R_f C_s \omega^2 + \omega^2 L_f (R_s + R_f) + 2\omega_c R_s R_f + \\ & 2K_{INV} \omega_c (k_p + k_r) (R_s + R_f); \\ E &= k_p K_{INV} \omega^2 (R_s + R_f) + \omega^2 R_s R_f. \end{aligned}$$

根据式(12)列劳斯表如表 2。

表 2 闭环特征方程劳斯表

Table 2 Routh array of closed-loop characteristic equation

$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0$			
s^4	A	C	E
s^3	B	D	null
s^2	Y	E	null
s^1	Z	null	null
s^0	E	null	null

其中, $Y = (BC - AD) / B$; $Z = (YD - EB) / Y$ 。

根据表 2 可知, 对于任意取值为正数的谐振系数, 均能保证劳斯表中第一列元素大于零, 即能满足系统稳定性要求。在 k_r 取值范围中选取 4 组值通过波特图进行稳定性分析, 图 5 所示为 k_r 分别取 0.1, 1, 10, 100 时系统的波特图。

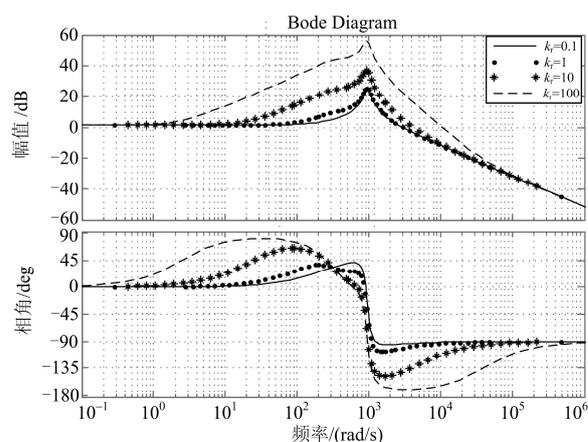


图 5 k_r 变化时系统波特图

Fig. 5 Bode diagram while k_r varies

从图 5 可以看出, k_r 分别为 4 个不同取值时, 系统均处于稳定状态, 且其相角裕度随着 k_r 取值的

增大而减小,但是 k_i 的减小会使系统的稳态误差变大。因此,取谐振系数 $k_r=10$ 。

综上所述,论文通过根轨迹法和劳斯判据设计比例谐振控制器比例系数 $k_p=1.11$,谐振系数 $k_r=10$,既能保证控制系统的稳定性,又能保证系统稳态误差精度,能够满足电流闭环控制需求。

软件流程图如图 6 所示。首先实时测量配电网三相电压和中性点电压;有源电压消弧装置第一次向配电网注入电流 I_{i1} 并测量中性点电压的幅值和相位,延时 1 s 后第二次向配电网中性点注入电流 I_{i2} ,再次测量中性点电压,并通过上述参考电流计算公式得到最优参考电流;当中性点电压大于 15% 相电压,判断接地故障发生,判断故障相并测量其电压;将参考电流和采样电流的差值经比例谐振控制器得到调制信号,再与三角载波比较后得到 IGBT 驱动脉冲,控制 IGBT 的通断产生逆变电流;逆变电流滤波后通过注入变压器注入配电网中性点,钳制故障点电压至零,实现消弧目的^[15-16]。

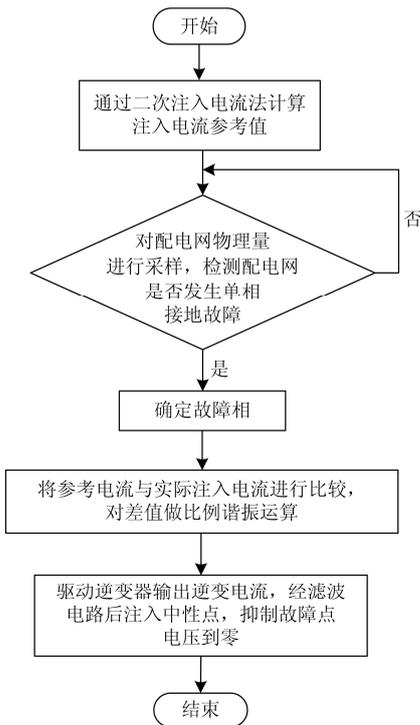


图 6 有源消弧流程图

Fig. 6 Flow chart of active arc-suppression

4 仿真分析

为了验证基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法的有效性,在 Psim9.0 搭建了图 1 所示的 10 kV 系统仿真模型,分别模拟了接地故障过渡电阻为 25 Ω 、200 Ω 、1 k Ω 、2 k Ω 的单相接地故障,其余仿真参数如表 1 所示。

在 0.1 s 单相接地故障发生后,0.2 s 投入有源电压消弧装置向电网中性点注入电流,其仿真结果如图 7—图 11 所示。图 7 为参考输出电流与实际输出电流仿真波形图,可以看出,控制系统对故障点电压的响应速度很快,通过测量发现,该系统对于故障点电压及故障电流的调整时间为 1 ms 左右,从输出电流仿真波形也可以看出,输出电流对参考值的跟踪效果显著,调整时间非常短,同时几乎无超调。稳态数据显示,稳态输出电流参考值为 74.45 A,实际输出值为 71.96 A,电流控制精度达到 96.7%。

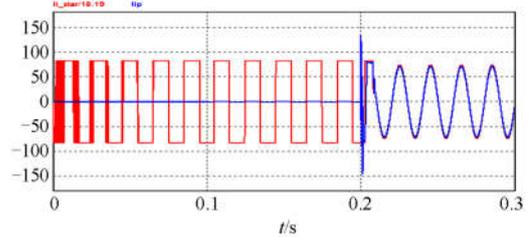


图 7 参考输出电流与实际输出电流仿真波形图
Fig. 7 Simulation waveforms of injecting current and reference current

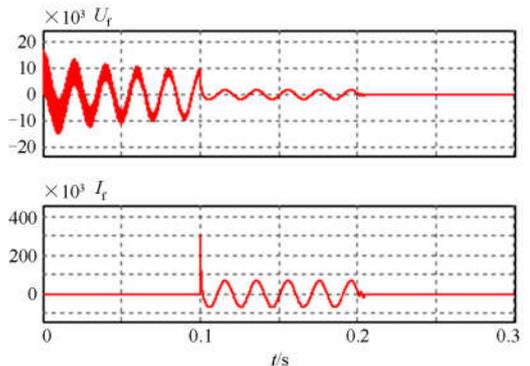


图 8 故障点电压和故障电流仿真动态波形图(25 Ω)
Fig. 8 Simulation waveform of fault point voltage and current (25 Ω)

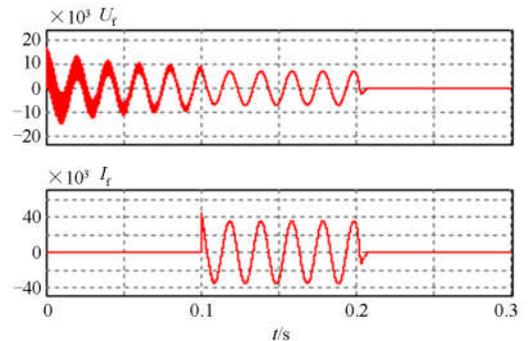


图 9 故障点电压和故障电流仿真动态波形图(200 Ω)
Fig. 9 Simulation waveform of fault point voltage and current (200 Ω)

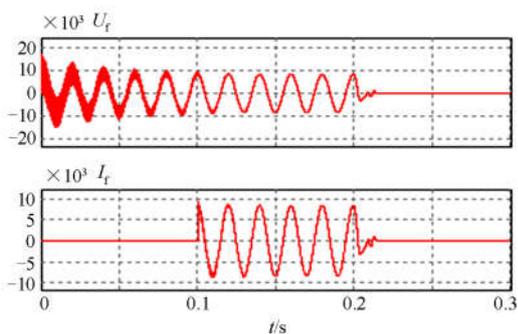


图 10 故障点电压和故障电流仿真动态波形图(1 kΩ)

Fig. 10 Simulation waveform of fault point voltage and current (1 kΩ)

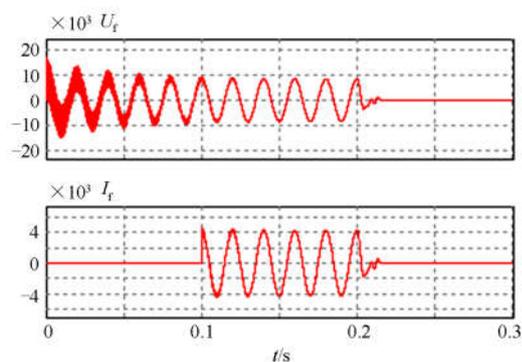


图 11 故障点电压和故障电流仿真动态波形图(2 kΩ)

Fig. 11 Simulation waveform of fault point voltage and current (2 kΩ)

过渡电阻分别为 25 Ω、200 Ω、1 kΩ、2 kΩ 的故障点电压和故障电流仿真动态波形图如图 8—图 11 所示, 仿真结果如表 3 所示, 从结果可看出, 对于不同的过渡电阻, 故障抑制率均可达 98% 以上, 消弧效果明显。

表 3 仿真结果

Table 3 Simulation results

故障电阻/Ω	故障电流幅值/A		故障电压幅值/V		抑制率/%
	故障时	补偿后	故障时	补偿后	
25	48.448	0.825	1.211×10^3	20.626	98.29
200	25.088	0.153	5.018×10^3	30.697	99.39
1 000	6.029	0.031	5.972×10^3	31.198	99.48
2 000	3.039	0.016	6.077×10^3	31.124	99.49

5 实验结果

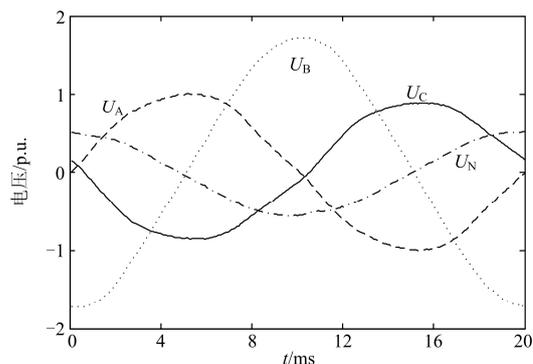
为了进一步验证基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法的效果, 开发了 10 kV 有源电压消弧装置工程样机, 并在 10 kV 真型配电网实验室中进行了接地故障模拟实验, 工程样机及实验现场接线如图 12 所示。



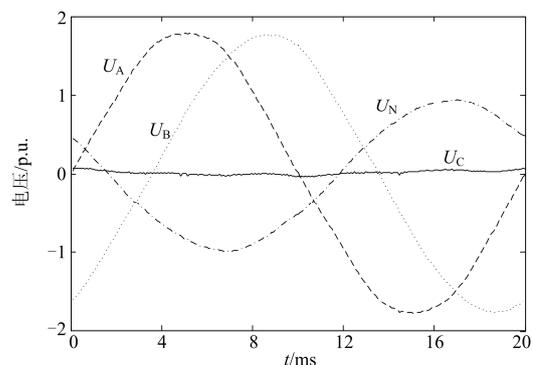
图 12 工程样机及实验现场接线图

Fig. 12 Photo of the prototype and experiment site

采用电能质量分析仪记录实验波形和数据的标么值。如图 13 所示。



(a) 补偿前三相电压和中性点电压波形



(b) 补偿后三相电压和中性点电压波形

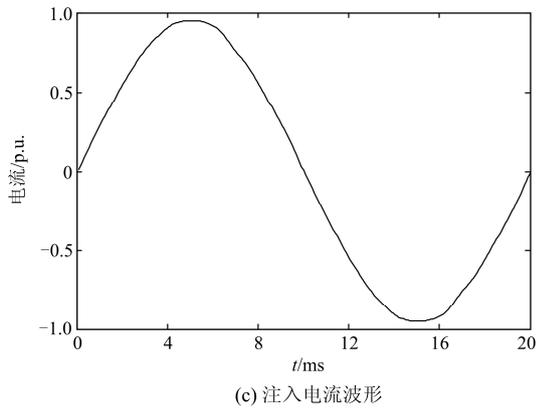


图 13 单相接地故障实验波形图

Fig. 13 Experimental waveform of single-phase ground

图 13(a)给出了单相接地故障在电流补偿前的三相电压和中性点电压波形;图 13(b)给出了补偿后的三相电压以及中性点电压;图 13(c)给出了注入电流波形图;可以得出表 4 中的数据。

表 4 注入电流前后配电网参数对比(标么值)

Table 4 Parameters contrast before and after injecting current (p. u.)

	A 相电压	B 相电压	C 相电压	中性点电压	注入电流
补偿前	0.80	1.31	0.922	0.321	0
补偿后	1.73	1.72	0.02	0.95	0.934

实验结果如表 4 所示,并分析实验所得波形数据可得故障相电压抑制幅度达到 97.8%,可以证明通过比例谐振电流闭环控制方法,能够抑制故障点电压和故障电流接近零,且响应速度快,波形畸变率低,消弧效果明显。实现了配电网单相接地故障的可靠消弧,验证了基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法的有效性。

6 结论

1) 提出了通过二次注入电流生成参考电流的方法,该方法无需测量配电网对地参数,具有安全简便、反应迅速、可操作性强的特点。

2) 所采用的比例谐振控制器可以弥补输出电流实际频率与控制器谐振频率之间的偏差引起的稳态精度偏低问题,保证了输出电流的控制精度,提高了系统的稳定性。

3) 开发了 10 kV 有源电压消弧装置工程样机,仿真及 10 kV 接地故障模拟实验证明了通过注入适当的电流能够抑制故障点电压,补偿配电网接地故障的无功电流分量、有功电流分量及谐波分量,实现瞬时接地故障快速、可靠灭弧;同时,该方法响应速度快、灵敏度高,装置造价低。

另外,由于实验条件限制,本文对有源电压消弧装置工程样机的 10 kV 接地故障模拟实验只进行了一组接地电阻阻值的实验,笔者将考虑进一步完善实验测试,进行多组不同阻值的接地故障实验。由于有源电压消弧装置是电力系统重要的一次设备,要将其推广应用,还需要进一步地完善其控制方法、实验测试以及现场工程验证。

参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] WINTER K M. The RCC ground fault neutralizer-a novel scheme for fast earth-fault protection[C] // 18th International Conference on Electricity Distribution, June 6-9, 2005, Turin, Italy: 6-11.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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 faults in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 128-133.
- [8] 曾祥君, 胡京莹, 王媛媛, 等. 基于柔性接地技术的配电网三相不平衡过电压抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 678-684.
- ZENG Xiangjun, HU Jingying, WANG Yuanyuan, et al. Suppressing method of three-phase unbalanced overvoltage based on distribution networks flexible grounding control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 678-684.
- [9] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.
- ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-Phase unbalanced overvoltage for distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 61-69.
- [10] 潘冬华, 阮新波, 王兴华, 等. 提高LCL型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-10, 21.
- PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 1-10, 21.
- [11] 李正明, 高远, 潘天红. 基于复合控制的有源电力滤波器电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 55-61.
- LI Zhengming, GAO Yuan, PAN Tianhong. Compensation current control of APF based on compound control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 55-61.
- [12] 吴云亚, 谢少军, 阚加荣, 等. 逆变器侧电流反馈的LCL 并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 54-60, 9.
- WU Yunya, XIE Shaojun, KAN Jiarong, et al. A full grid voltage feed-forward control strategy with inverter-side current feedback for LCL grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 54-60, 9.
- [13] 满灿, 王宝华. LCL 型三相并网逆变器自适应控制策略及其参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 134-142.
- MAN Can, WANG Baohua. Adaptive control strategy and its parameter design of grid-connected inverters with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 134-142.
- [14] 鲍陈磊, 阮新波, 王兴华, 等. 基于PI调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142, 19.
- BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142, 19.
- [15] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
- CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [16] ZHU Ke, ZHANG Peng, WANG Wencong, et al. Controlled closing of PT delta winding for identifying faulted line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 79-86.
-
- 收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2018-02-02
- 作者简介:
- 彭沙沙(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制;
- 曾祥君(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: eexjzeng@qq.com
- 喻 琨(1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制。
- (编辑 葛艳娜)