

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190297

66 kV 中压配电网中性点位移电压产生机理及有源抑制方法

王振浩¹, 佟林¹, 李赫², 成龙¹, 李国庆¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;
2. 国网内蒙东电力有限公司通辽供电公司, 内蒙古 通辽 028000)

摘要: 分析 66 kV 配电网中性点位移电压产生的原因, 提出一种基于有源调节技术的中性点位移电压抑制方法。通过向中性点注入电流来补偿因线路对地参数不平衡引起的不对称电流, 结合实际电网运行参数, 分析注入电流的幅值、相位与中性点位移电压间的约束关系, 确定注入电流值。采用向电网注入恒频间谐波测量信号的系统状态辨识方法, 结合电压、电流双闭环控制, 实现有源逆变装置对中性点位移电压的有效抑制。最后通过基于 Matlab/Simulink 的配电网仿真实验及实际物理实验, 验证所提方法的正确性及有效性。

关键词: 配电网; 中性点位移电压; 三相不平衡; 有源逆变装置; 注入电流

66 kV medium voltage distribution network neutral displacement voltage generating mechanism and active suppression method

WANG Zhenhao¹, TONG Lin¹, LI He², CHENG Long¹, LI Guoqing¹

(1. New Technology of Modern Power System Simulation Control and Green Power Key Laboratory of the Ministry of Education (Northeast China Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. Tongliao Power Supply Company, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Limited Company, Tongliao 028000, China)

Abstract: This paper analyzes the causes of neutral point displacement voltage generation in 66 kV distribution network and proposes a method for inhibiting the neutral point displacement voltage based on an active regulation techniques. It compensates for the asymmetry of the unbalanced current due to the line parameters caused by injecting current into the neutral point, and combining with actual grid operating parameters, analyzes the relationship between the amplitude and phase of the injected current and the displacement voltage of the neutral point to determine the injected current. The state identification system method that injects constant frequency harmonic measurement signal to the grid is employed, which achieves effective suppression of neutral point displacement voltage by active inverter combining with voltage and current double closed loop control. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed method is verified by using the Matlab/Simulink-based distribution network simulation experiment and actual physical experiment.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGMDTL00FCJS1800748) and Project of Science and Technology Department of Jilin Province (No. 20160307014GX).

Key words: distribution network; neutral point displacement voltage; three-phase unbalance; active inverter device; injection current

0 引言

我国 66 kV 配电网普遍以经消弧线圈接地或不接地方式为主, 在不接地系统中, 由于架空线路换位欠佳、配电网带高压负载、铁磁谐振的出现等原

因均会导致三相对地参数的互不相等, 使得中性点出现不对称电压^[1-2], 而且在经消弧线圈接地的系统中, 消弧线圈的投入加大了中性点与大地之间的零序阻抗, 使得中性点位移电压加大^[3], 较大的过电压会使电力线路、变压器、互感器等电气设备的效率与性能下降, 降低电网的安全与经济性能^[4]。

现有的配电网中性点位移电压的抑制方法主要采用投切三相耦合电容器的方法, 补偿线路对地

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGMDTL00FCJS1800748); 吉林省科技厅项目资助(20160307014GX)

电容的不平衡,该方法操作简单,在电力系统中得到广泛应用^[5],但实际运行中,此方法难以实时跟踪电网的动态变化,不能做到中性点电压的动态补偿。随着电力电子技术的发展,采用可关断的IGBT(Insulated-gate Bipolar Transistor)组成自换相桥式电路的静止同步补偿器^[6],可以补偿低压配电网因三相负载不平衡产生的中性点位移电压,在补偿不平衡负荷问题中应用越来越广^[7],但是在中压配电网运行中,三相不平衡的主要原因是线路对地电容的不相等,此方法不能抑制由于对地参数不平衡而导致的过电压^[8]。

近年来,采用有源补偿技术是针对抑制中性点位移电压提出的新方法。文献[9]首次提出通过向配电网注入零序电流,改变中性点位移电压的相位与幅值,使得中性点电压为0,但是没有具体说明如何控制注入电流;文献[10]采用迭代的方式,先确定注入电流的最优相位,后确定最优幅值,原理类似二分法,操作繁琐,且计算速度较慢,当电网参数发生变化时,因为其收敛速度较慢,无法快速响应,补偿效果较差;文献[11]采用差分法来计算注入电流的最优幅值与相位,该方法虽然收敛速度快,但是在计算中需要已知线路三相对地电容参数,由于实际中难以测量对地电容,所以实施起来较为困难;文献[12]采用电压控制方式,以中性点电压为控制目标,增加反馈补偿环节,但实际还是通过注入电流调节电压,单闭环的控制方式无法很好地抵抗负载的扰动,无法在对地参数发生变化时,使抑制中性点位移电压的效果达到最好。

本文在研究系统正常运行时中性点位移电压产生机理的基础上,提出向中性点注入电流的有源抑制方法,并结合现场参数,解析了中性点位移电压与注入电流之间的约束关系,提出通过注入信号辨识三相不平衡状态以及有源逆变装置的电压电流双闭环控制方法,最终有效抑制中性点位移电压,并通过仿真及实验证明了方法的可行性、有效性。

1 有源抑制方法原理

有源逆变装置如图1所示,由三相交流源经不可控整流器整流为直流电,通过放电电阻 R_{dc} 、充电电容 C_{dc} 缓冲无功能量,再经逆变器和滤波电感 L_0 滤波电容 C_0 组成的滤波电路,形成单相交流电流。此有源逆变装置相当于在中性点与大地之间形成了一个阻抗为无穷大的电流通路,通过向中性点注入零序电流,达到抑制不对称电压的目的,同时不改变原有的接地方式,所以可将其近似等效成一个幅值与相位可控的电流源。

含有源逆变装置的配电网如图2所示, \dot{E}_a 、 \dot{E}_b 、 \dot{E}_c 分别为三相电源电压; \dot{U}_0 为中性点位移电压; L 、 g_L 分别为消弧线圈调谐电感与损耗电导; \dot{I}_s 为注入的零序电流; K 为单相高压开关; T 为隔离变压器,变比为1:1,它可以使有源逆变装置与中性点之间电气隔离,保证原副边的绝缘性能,通过向中性点注入电流达到抑制位移电压的目的; C_a 、 C_b 、 C_c 为配电网各相对地电容; g_a 、 g_b 、 g_c 为配电网各相泄漏电导。

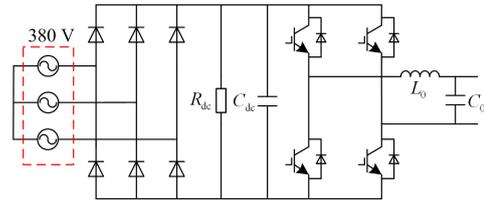


图1 有源逆变装置

Fig. 1 Active inverter device

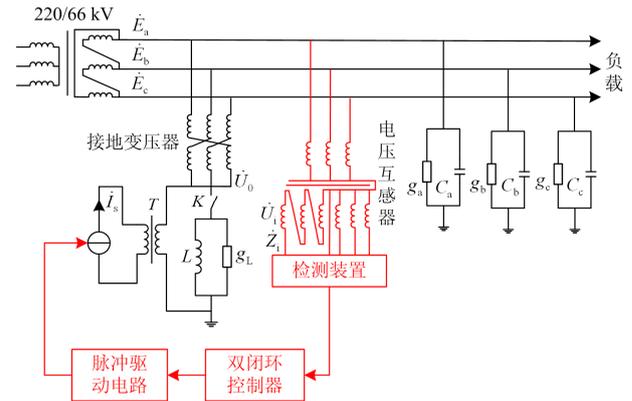


图2 有源抑制配电网原理图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of active suppression distribution network

投入消弧线圈之前,为中性点不接地系统,不对称电压为

$$\dot{U}_{00} = -\frac{\dot{\varepsilon}}{1-jd}U_{ph} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_a + \alpha^2 C_b + \alpha C_c}{C_\Sigma} \quad (2)$$

式中: U_{ph} 为电网相电压; d 为系统的阻尼率,一般为1.5%~2.0%,忽略阻尼率,可得 $\dot{U}_{00} = -\dot{\varepsilon}U_{ph}$; $\dot{\varepsilon}$ 为电网的不对称度,不得超过2%。根据基尔霍夫定律可知

$$\dot{U}_{00}(j\omega C_\Sigma + g_\Sigma) = -\dot{E}_a[(j\omega C_a + g_a) + \alpha^2(j\omega C_b + g_b) + \alpha(j\omega C_c + g_c)] + \dot{I}_s \quad (3)$$

表 1 各相线路参数

Table 1 Phases' line parameters				
线路类型	导线型号	线路长度/km	对地电容/(nF/km)	
架空线	LGJ-240/30	51.677	A 相	4.318
			B 相	3.886
			C 相	4.602
	LGJ-150/25	62.026	A 相	4.507
			B 相	3.834
			C 相	4.238
电缆	HD-YJLW03	9.43	250	

注入的零序电流由 220/66 kV 的角形接线侧接地变压器中性点注入到系统中, 因为注入的零序电流仅有几安培, 远小于线路中的正、负序电流, 而且注入的零序电流会经系统的对地导纳流入大地, 不会影响负载电流的变化, 仅补偿了由于对地参数不平衡引起的不对称电流, 从而抑制中性点位移电压, 所以本文主要研究的是配电网对地的零序回路, 且不考虑负载的影响。

等效系统的三相对地电容分别为 $C_a=2.859 \mu\text{F}$; $C_b=2.795 \mu\text{F}$; $C_c=2.858 \mu\text{F}$; 现场测得的电容电流为 105 A; 消弧线圈失谐度为 -6.18%; 系统阻尼率为 3.5%。经计算可得消弧线圈调谐电感 $L=1.08 \text{ H}$; $C_\Sigma=8.512 \times 10^{-6} \text{ F}$; $g_\Sigma=7.5 \times 10^{-5} \text{ s}$; $g_L=2.35 \times 10^{-5} \text{ s}$; 不对称度 $\varepsilon=0.00746 \angle 59.2^\circ$ 。

根据式(2)、式(4)可得

$$U_0 = \sqrt{\frac{I_s^2 + E_a^2 \omega^2 C_\Sigma^2 \varepsilon^2 + 2E_a I_s \omega C_\Sigma \varepsilon \sin(\varphi_\varepsilon - \varphi_s)}{(g_\Sigma + g_L)^2 + (\omega C_\Sigma - \frac{1}{\omega L})^2}} \quad (8)$$

式中: I_s 为注入电流的幅值; φ_s 为注入电流相位; ε 为不对称度幅值; φ_ε 为不对称度相位。

由于实际现场中的三相对地参数不易测量, 所以为了抑制中性点位移电压的产生, 就要找出 \dot{U}_0 与注入电流 $I_s \angle \varphi_s$ 之间的约束关系, 通过改变注入电流的幅值与相位使中性点位移电压达到最小。

令

$$U_0 = f(I_s, \varphi_s) = \sqrt{\frac{I_s^2 + C + 2I_s D \sin(\varphi_\varepsilon - \varphi_s)}{A^2 + B^2}} \quad (9)$$

式中: $A = g_\Sigma$; $B = \omega C_\Sigma - 1/\omega L$; $C = E_a^2 \omega^2 C_\Sigma^2 \varepsilon^2$; $D = E_a \omega C_\Sigma \varepsilon$ 。

通过现场参数计算所得的数据代入式(9)并绘制注入电流幅值及相位与中性点位移电压的关系图 5, 可以直观地看出两者之间的关系。

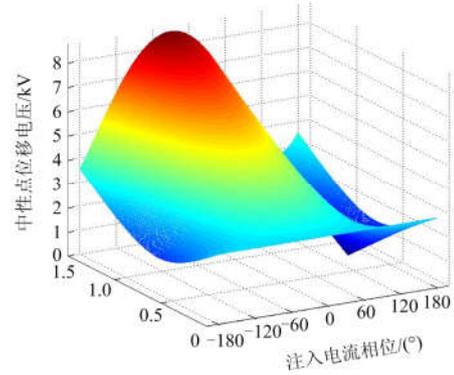


图 5 注入电流与中性点位移电压关系

Fig. 5 Injection current relationship with neutral displacement voltage

根据式(9)分别对 I_s 、 φ_s 求偏导数得

$$f'_{I_s}(I_s, \varphi_s) = \frac{I_s + D \sin(\varphi_\varepsilon - \varphi_s)}{\sqrt{A^2 + B^2}} \times \quad (10)$$

$$\left[I_s^2 + C + 2I_s D \sin(\varphi_\varepsilon - \varphi_s) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$f'_{\varphi_s}(I_s, \varphi_s) = \frac{-I_s D \cos(\varphi_\varepsilon - \varphi_s)}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (11)$$

$$\left[I_s^2 + C + 2I_s D \sin(\varphi_\varepsilon - \varphi_s) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

求方程 $f'_{I_s}(I_s, \varphi_s) = 0$ 、 $f'_{\varphi_s}(I_s, \varphi_s) = 0$ 的所有实数解与偏导数不存在的点, 得

$$\begin{cases} I_{s0} = -D \sin(\varphi_\varepsilon - \varphi_{s0}) \\ \cos(\varphi_\varepsilon - \varphi_{s0}) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

当 $\varphi_\varepsilon - \varphi_{s0} = \pm \pi/2$, $I_{s0} = \pm D = \pm E_a \omega C_\Sigma \varepsilon$ 时, U_0 可能取得极值, 但由于其二阶偏导数均不存在, 无法判断其极值的性质及其是否存在。

当 $\varphi_\varepsilon - \varphi_{s0} = \pi/2$ 时, $I_{s0} = -E_a \omega C_\Sigma \varepsilon = -0.758 \text{ A}$, $\varphi_{s0} = -30.8^\circ$; $\varphi_\varepsilon - \varphi_{s0} = -\pi/2$ 时, $I_{s0} = 0.758 \text{ A}$, $\varphi_{s0} = 149.2^\circ$ 。可以看出

$$I_{s0} = -0.758 \angle -30.8 = 0.758 \angle 149.2 \quad (13)$$

图 6 表示将注入电流幅值看成常量, 通过改变注入电流的相位, 可以看出中性点位移电压以 $\varphi_s = -30.8^\circ$ 与 $\varphi_s = 149.2^\circ$ 为对称轴, 向两侧呈正弦与余弦形式变化, 当 $\varphi_s = -30.8^\circ$ 时中性点位移电压达到最大值, 当 $\varphi_s = 149.2^\circ$ 时中性点位移电压达到最小值。

同样, 将注入电流相位看成常量, 如图 7 所示, 可以看出在 $\varphi_s = 149.2^\circ$ 时, 注入电流幅值由 0 A 增大到 0.758 A 时, 中性点位移电压不断减小, 在 $I_s = 0.758 \text{ A}$ 时达到最小。

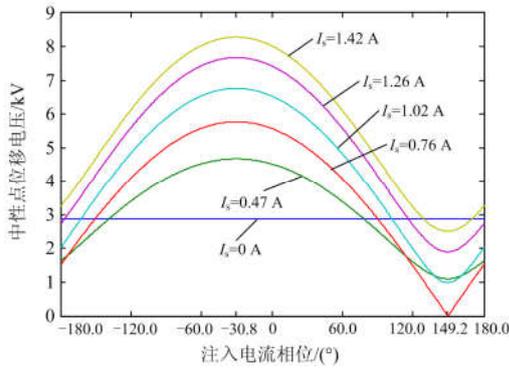


图 6 注入电流相位与中性点位移电压关系

Fig. 6 Relations of injection current phase and neutral displacement voltage

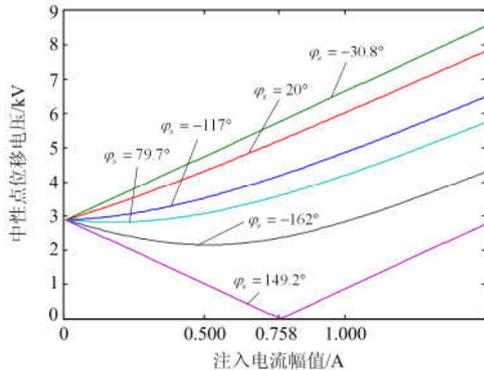


图 7 注入电流幅值与中性点位移电压关系

Fig. 7 Relations of injection current amplitude and neutral displacement voltage

综上所述, 可以判断出 $\dot{I}_s = 0.758 \text{ A} \angle 149.2^\circ$, 为此 66 kV 系统三相不平衡抑制的唯一最优注入电流, 通过控制有源逆变装置向中性点注入此电流, 使 $\dot{U}_0 = 0$, 即可有效抑制中性点位移电压的产生。

3 配电网中性点位移电压抑制策略

3.1 配电网三相不平衡辨识

由于三相不平衡所产生的中性点位移电压与单相接地故障和发生铁磁谐振时所产生的零序电压特征相似, 难以区分^[13], 且每一种情况的处理方法不同^[14], 单相接地故障时, 要进行接地故障消弧和保护^[15], 铁磁谐振则需安装阻尼电阻或改变系统参数^[16], 因此辨识中性点位移电压产生的原因成为了配电网三相不平衡过电压抑制的前提。

根据图 2 的配电网系统图, 建立如图 8 所示的等效测量系统, 通过有源逆变装置向配电网注入一恒频信号(频率选择不能离工频太近且要与工频整数倍的谐波频率相区分, 为一间谐波信号, 以免影

响电网的正常运行, 方便检测信号的分离), 注入信号到系统一次侧后, 通过系统的对地电容构成回路, 注入信号在线路及对地电容上产生的压降可以通过开口三角形电压互感器测到。由于线路自身的阻抗与对地电容的容抗相比很小, 且接地变压器一般为 Z 型变压器, 零序阻抗很小, 所以可以忽略不计, 近似认为 \dot{U}_i 就是在测量信号在对地导纳上的压降。

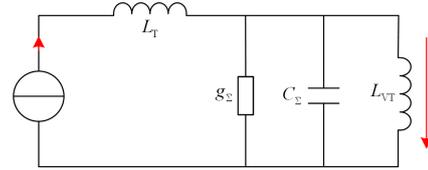


图 8 配电网辨识故障类型等效图

Fig. 8 Equivalent figure of distribution network to identify fault types

测量电流信号为 \dot{I}_i , 在开口处测得的测量电压为 \dot{U}_i , 则测量的辨识导纳大小为

$$Y_i = \frac{\dot{I}_i}{\dot{U}_i} = g_S + jB_i \quad (14)$$

$$B_i = m(\omega_1 C_S - \frac{1}{\omega_1 L_{VT}}) \quad (15)$$

式中: g_S 为系统总泄露电导; m 为实数; ω_1 为基波角频率; C_S 为系统总对地电容; L_{VT} 为电压互感器等效励磁电感。

可以看出, 与系统正常运行情况相比, 当发生单相接地故障时, 由于过渡电阻的影响, g_S 会增大, B_i 大小基本保持不变; 铁磁谐振时, 由于电压互感器出现饱和, 其等效励磁电感将会减少, 并与系统对地电容发生并联谐振, 近似为开路状态, g_S 基本保持不变, B_i 会减少; 如果是三相不平衡, 则网络拓扑基本不变, g_S 、 B_i 无明显变化。综上所述, 与系统正常运行的情况相比, 通过测量导纳中实部与虚部的变化情况, 可以辨识出配电网中性点位移电压产生的原因, 从而采取相关的措施。

配电网三相不平衡故障辨识及有源抑制流程如图 9 所示, 首先实时检测配电网母线的中性点电压, 当中性点电压大于相电压 5% 时, 通过向配电网注入电流测量信号, 然后从母线上的电压互感器开口处测得电压信号, 通过计算测量导纳, 观察测量导纳实部、虚部与正常运行时的变化情况, 如果中性点电压的增大是由于三相不平衡造成的, 则通过电压电流双闭环技术控制有源逆变装置向中性点注入零序电流, 即可有效抑制中性点位移电压。

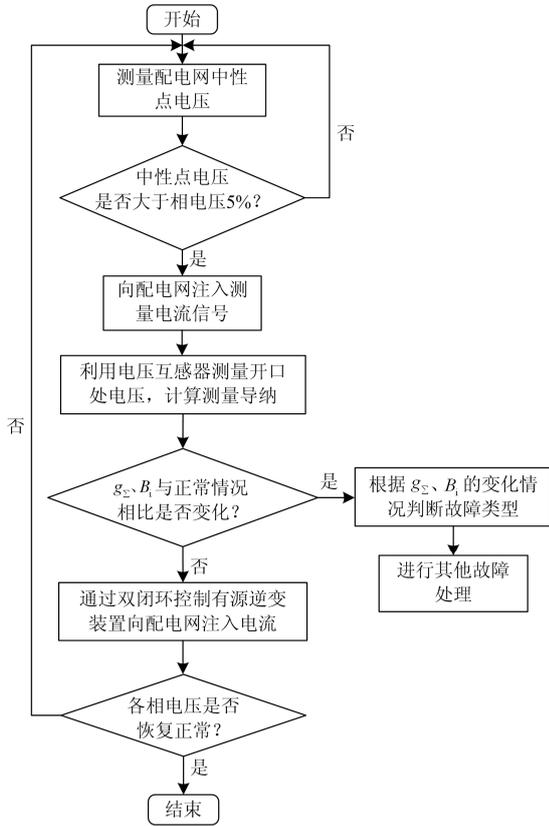


图9 配电网三相不平衡故障辨识及有源抑制流程图
Fig. 9 Distribution network flow chart of unbalanced three-phase fault identification and active suppression

3.2 双闭环控制

如果已知现场的对地电容参数, 可利用式(7)向中性点注入计算电流, 抑制中性点位移电压。但实际电网的对地参数难以测量, 且配电网会经常出现系统结构、参数发生变化的情况, 会影响抑制中性点位移电压的效果, 为应对这些问题, 采用反馈内环可增加系统的稳定性, 但单闭环无法很好地抵抗负载的扰动, 所以根据有源逆变装置抑制的主要目标是中性点位移电压, 采用电压外环 PR 控制将谐振频率设置成电网基波频率, 使电压在基波频率处的增益近似为无穷大, 而在其他频率处的增益却很小, 因此能有效滤除非基频处的谐波, 消除稳态误差, 还可以消除谐波与负载扰动对逆变器输出电流的影响^[17], 增加为电流内环提供参考电流的准确性, 参考电流与采样电流的差值经 PI 控制器后得到脉冲宽度调制技术(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)调制信号, 与三角载波比较后得到开关的驱动脉冲, 控制开关的开断产生注入电流后, 经滤波电路注入到中性点, 抑制中性点位移电压的形成^[18]。

图 10 为有源逆变装置基于电压外环 PR 控制和电流内环 PI 控制的双闭环控制方法, 电压外环以中性点电压等于 0 为控制目标, 从而达到抑制中性点位移电压产生的目的, 电压外环输出电流内环的参考值, 注入电流的采样信号通过 PI 控制器实现对参考信号的实时跟踪^[19]。

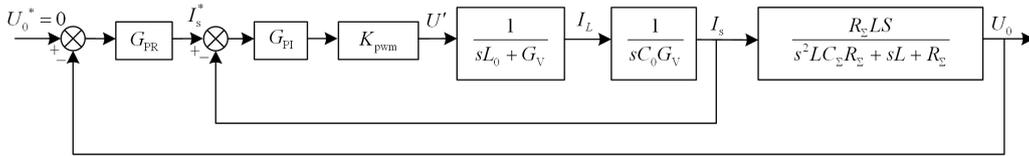


图 10 电压电流双闭环控制框图
Fig. 10 Block diagram of voltage and current double closed-loop control

图中: I_s^* 为注入电流的参考值; G_{PR} 为比例谐振控制器的传递函数; G_{PI} 为比例积分控制器的传递函数; K_{pwm} 为逆变器的等效增益; U' 为逆变器的输出电压; I_L 为流出滤波电感的电流值; L_0 、 C_0 分别为滤波器的电感与电容值; $R_Σ = R_a // R_b // R_c // R_L$ 为电网线路泄露电阻与损耗电阻并联后的等效电阻; $C_Σ$ 为系统对地电容之和; I_s 为流出滤波电路的采样注入电流; $G_V(s)$ 为流过滤波电感的电流与注入电流之间的传递函数, 如式(16)所示。

$$G_V(s) = \frac{R_Σ L s}{s^2 L R_Σ (C_Σ + C_0) + sL + R_Σ} \quad (16)$$

由于系统采用的是变比为 1:1 的隔离变压器, $R_Σ$ 、 $C_Σ$ 、 L 经折算后的值不变, 所以令

$$G_0(s) = \frac{1}{(sL_0 + G_V)(sC_0G_V)} \quad (17)$$

$G_s(s)$ 为注入电流与中性点位移电压之间的传递函数, 且有

$$G_s(s) = \frac{R_Σ L S}{s^2 L C_Σ R_Σ + sL + R_Σ} \quad (18)$$

简化后的控制框图为图 11 所示。

电流内环的传递函数为

$$G_{in}(s) = \frac{G_{PI} K_{pwm} G_0}{1 + G_{PI} K_{pwm} G_0} \quad (19)$$

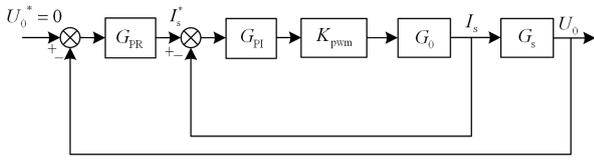


图 11 电压电流双闭环控制等效框图

Fig. 11 Equivalent block diagram of voltage and current double closed-loop control

式中, $G_{PI} = K_p + K_I/s$, K_p 、 K_I 分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数。

电压外环的传递函数为

$$G_{out}(s) = \frac{G_{PR} G_{in} G_s}{1 + G_{PR} G_{in} G_s} \quad (20)$$

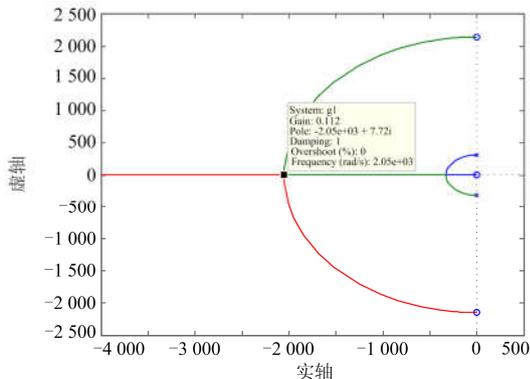
式中, $G_{PR} = K_p + 2K_R \omega_c s / (s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2)$, 其中 K_p 、 K_R 分别为 PR 控制器的比例系数和谐振系数, ω_c 为截止频率, ω_0 为谐振频率。

针对所提的双闭环控制方法, 本文以 PI 控制器的比例系数和 PR 控制器的谐振系数作为参变量, 绘制双闭环传递函数的根轨迹图, 根据参数变化对系统性能的影响, 验证控制系统的稳定性, 如图 12 所示。其余控制系统参数如表 2 所示。

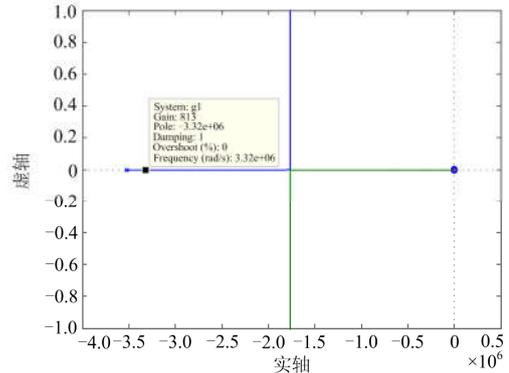
表 2 控制系统参数

Table 2 Control system parameters

参数名称	符号	数值
电网对地电容	C_c	8.512 μF
电网泄漏电阻	R_c	10 152 Ω
消弧线圈电感	L	1.08 H
滤波电感	L_0	2 mH
滤波电容	C_0	100 μF
截止频率	ω_c	3 500 rad/s
谐振频率	ω_0	100 π rad/s
PI 控制器积分系数	K_I	10
PR 控制器比例系数	K_p	30



(a) 电流内环传递函数根轨迹图



(b) 电压外环传递函数根轨迹图

图 12 双闭环传递函数根轨迹图

Fig. 12 Double closed-loop transfer function root locus map

由于电流内环的参变量 K_p 位于其开环传递函数的 $G_{PI} K_{pwm} G_0$ 的因式中, 不能直接用原开环传递函数的零点绘制根轨迹, 需要把闭环特征方程中不含 K_p 各项去除, 利用系统等效的开环传递函数绘制根轨迹图^[20]。

根据根轨迹图可以看出, 双闭环控制系统的特征根均在虚轴的左半平面, 可以验证此系统是稳定的, 合理地选取控制器系数, 就可满足系统的输出响应及其性能指标^[21]。

4 实验验证

4.1 仿真实验及结果分析

为了验证双闭环控制的有源逆变装置的抑制效果, 根据第 2 节某地区的系统参数, 采用 Matlab 仿真建立 66 kV 系统配电网, 电网频率 50 Hz, 直流侧放电电阻 10 k Ω , 充电电容 0.047 F, 滤波电感 2 mH, 滤波电容 100 μF , LGJ-150/25 型号架空线路零序电阻 $r_0 = 0.336 \Omega/\text{km}$; 零序电感 $L_0 = 4.655 \text{ mH}/\text{km}$; LGJ-240/30 零序电阻 $r_0 = 0.26 \Omega/\text{km}$; 零序电感 $L_0 = 4.61 \text{ mH}/\text{km}$; 电缆线路 $r_0 = 1.23 \Omega/\text{km}$; $L_0 = 1.67 \text{ mH}/\text{km}$; 一般泄露电阻为对地电容容抗的 20 倍以上, 仿真采用 $g_a = g_b = g_c = 2.5 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。

在系统出现不平衡状况 0.05 s 后, 投入有源逆变装置向系统注入零序电流, 由图 13 可以看出, 在投入装置之前, 中性点位移电压的峰值已将近达到 4 kV, 超出了相电压的 5%, 三相不平衡情况已经相当严重^[22], 注入零序电流后, 中性点电压被抑制到了 20 V 以内, 抑制效果良好。

图 14 为抑制前后三相电压仿真波形, 注入电流前三相电压严重不平衡, A 相的相电压有效值比 B 相高出将近 5 kV, 注入电流后, 三相电压恢复平

衡状态,注入电流前后配电网各相参数对比见表 3。

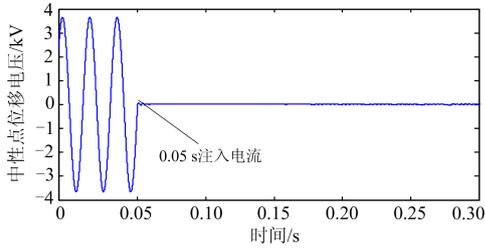


图 13 注入电流前后中性点位移电压波形

Fig. 13 Neutral displacement voltage waveform before and after the injection current

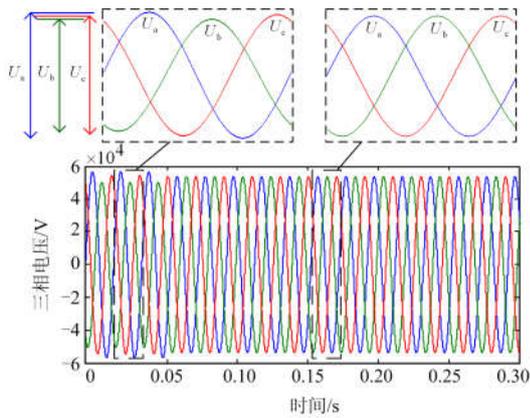


图 14 注入电流前后三相电压波形

Fig. 14 Three-phase voltage waveform before and after the injection current

表 3 仿真结果对比

Table 3 Simulation results contrast

工况	A 相电 压峰值/ V	B 相电 压峰值/ V	C 相电 压峰值/ V	中性点 电压 峰值/V	不对称 度/%	注入 电流/A
注入电流前	56 806	50 502	54 541	3 662	3.4	0
注入电流后	53 908	53 912	53 908	18	0.002	$0.92 \angle 152^\circ$

图 15 为抑制前后中性线上的零序电流,在 0.05 s 之前,中性线上的零序电流为 $U_0 / (R_L + j\omega L)$,

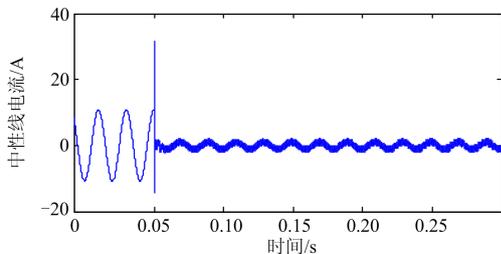


图 15 注入电流前后中性线上的电流波形

Fig. 15 Neutral line current waveform before and after the injection current

0.05 s 后,由于注入的零序电流补偿了投入消弧线圈前三相对地的不对称电流,使消弧线圈相当于短路状态,所以此时中性线上的电流就是注入的零序电流。

图 16 为注入电流与参考电流的对比波形,可以看出注入电流能迅速、精确地跟踪参考电流,控制效果良好。

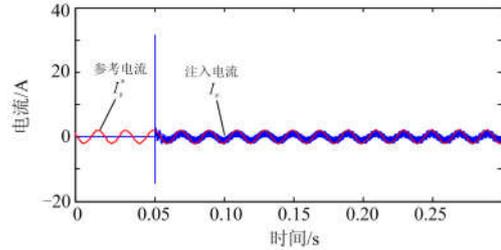


图 16 参考电流与注入电流波形

Fig. 16 Reference current and injection current waveform

由于仿真过程中存在着一些不可避免的误差,比如线路、变压器等负荷因素都会使仿真与理论出现不同,无法抑制中性点电压到 0,输出的注入电流与理论值也有一定的偏差,但是偏差很小,而且抑制率可达 98%以上,消除了因为三相不平衡所导致的中性点位移电压,可以验证所提理论及控制方法的正确性与可行性。

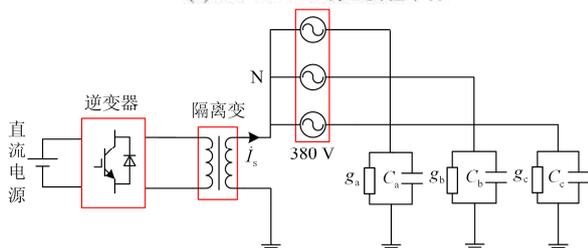
4.2 物理实验及结果分析

有源抑制方法的关键是通过注入电流补偿投入消弧线圈前因三相对地参数不平衡所产生的不对称电流,为了进一步验证补偿对地电流对中性点位移电压的抑制效果,搭建了如图 17(a)所示的物理实验平台。实验在 380 V 中性点不接地配电网模拟系统中进行,逆变器容量为 5 kVA,其开关频率为 10 kHz,调制比为 0.85;逆变器直流侧采用 Agilent-CN5771A 型直流稳压电源,其输出电压设置为 350 V;单相隔离变压器型号为 BK-3000,变比为 1:1;三相对地支路通过 MCL-33 型电路实验模块模拟,A、B、C 三相电导均设置为 10^{-3} s,三相对地电容分别设置为 25 μ F、60 μ F、25 μ F;实验中使用的示波器型号为 MS-05204B。实验中将逆变器经隔离变压器串入中性点,通过中性线向电网注入补偿电流,系统接线如图 17(b)所示。

根据三相对地参数,通过式(1)、式(2)、式(5)计算可得,不对称度 ε 为 0.32,中性点电压幅值为 $98.98 \angle 60^\circ$ V,注入电流应为 $\dot{I}_s = \varepsilon j\omega C_\Sigma \dot{E}_a = 2.4 \angle -30^\circ$ A。



(a) 380 V/5 kVA 物理实验平台



(b) 实验系统接线图

图 17 物理实验平台

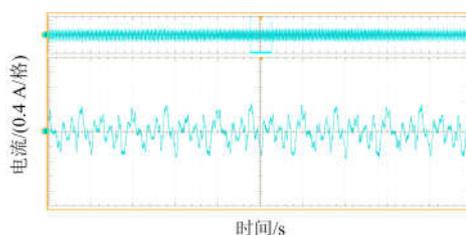
Fig. 17 Physical experimental system

图 18(a)和图 18(b)为补偿前后中性线上的电流波形, 图 18(c)和图 18(d)为补偿前后的三相电压与中性点电位波形图。补偿前, 中性线电流为三相对地电流之和: $\dot{E}_a Y_a + \dot{E}_b Y_b + \dot{E}_c Y_c$, 由图 18(a)可以看出电流的幅值约为 3.6 A, 将计算所得的理论值作为参考, 逆变器自动调节输出, 使注入的零序电流能够补偿三相对地的不对称电流, 尽可能地将中性线上的电流降低到最小。补偿后中性线上的电流幅值约为 1.6 A, 中性线电流大幅降低, 如图 18(b)所示。在注入电流之前 A、C 两相电压波形幅值为 340 V, B 相幅值低于其余两相约 140 V, 不对称度为 0.31, 中性点电压幅值为 97 V, 如图 18(c)所示, 与理论计算结果吻合。通过不断调节注入电流, 使中性点位移电压幅值恢复至 7 V, 此时不对称度为 0.017, 三相电压接近平衡, 如图 18(d)所示。分析实验结果表明, 采用有源抑制方法, 通过注入电流补偿中性线上因线路对地参数不平衡引起的不对称电流, 继而抑制中性点位移电压。注入电流前后配电网各相参数对比见表 4。

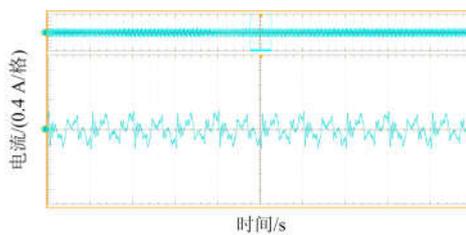
表 4 实验结果对比

Table 4 Experimental results contrast

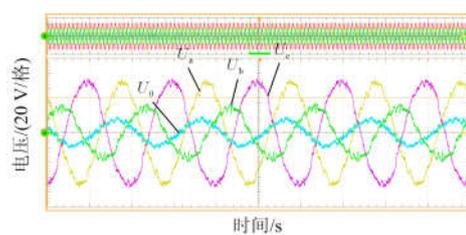
工况	A 相电 压峰值/ V	B 相电 压峰值/ V	C 相电 压峰值/ V	中性点 电压 峰值/V	不对称 度/%	注入 电流/A
注入电流前	339.7	198.2	340.4	97	32	0
注入电流后	246.8	243.2	244.6	10	1.7	2.08∠-31°



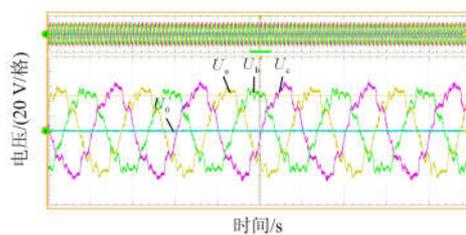
(a) 补偿前中性线上电流波形



(b) 补偿后中性线上电流波形



(c) 补偿前三相电压及中性点电压波形



(d) 补偿后三相电压及中性点电压波形

图 18 补偿前后实验波形图

Fig. 18 Experimental waveform diagram before and after compensation

5 结论

1) 本文首先根据中性点不接地和经消弧线圈接地配电网中性点位移电压产生的原因, 提出利用电网不对称度的有源抑制方法, 通过有源逆变装置向中性点注入零序电流, 补偿了投入消弧线圈前的三相对地不对称电流, 从而抑制了中性点位移电压的产生。

2) 根据某地区 66 kV 系统的现场参数, 分析中性点位移电压与注入电流之间的约束关系, 找出能够有效抑制中性点位移电压产生的唯一注入电流。

3) 提出辨识配电网位移电压产生原因的方法, 利用向配电网注入测量信号的方法辨识系统的状态。为解决配电网对地参数难以测量的问题, 提出采用电压电流双闭环的控制方法, 控制有源逆变装

置产生零序电流。

4) 搭建了 66 kV 系统的仿真模型, 验证有源抑制及双闭环控制方法的可行性与正确性, 并通过实验结果表明控制有源逆变装置可以补偿三相对地的不对称电流, 从而抑制中性点电压到安全水平, 使三相电压恢复正常水平。

参考文献

[1] 要焕年. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 148-155.
PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 148-155.

[3] 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.

[4] ZENG X, XU Y, WANG Y. Some novel techniques for insulation parameters measurement and Petersen-coil control in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1445-1451.

[5] 张有玉, 郭珂, 周林, 等. 三相三线制系统电压不平衡度计算方法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 123-128.
ZHANG Youyu, GUO Ke, ZHOU Lin, et al. A method to compute voltage unbalance factor in three-phase three-wire system[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 123-128.

[6] 王朋, 田翠华, 陈柏超, 等. 基于新型磁控消弧线圈的电磁混合消弧及配合选线新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 175-183.
WANG Peng, TIAN Cuihua, CHEN Baichao, et al. Electromagnetic hybrid arc suppression and a novel method of feeder selection based on the novel magnetic controlled Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 175-183.

[7] 李涛, 苗晓鹏, 李晓波. 基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 86-90.
LI Tao, MIAO Xiaopeng, LI Xiaobo. A new tuning method of arc suppression coil based on the constant zero-sequence voltage amplitude[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 86-90.

[8] BAI F, LIU Y, LIU Y. A measurement-based approach for

power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 17-25. DOI: 10.1186/s41601-016-0014-0.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 李晓波, 李康, 蒋峰景, 等. 一种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(29): 111-117.
LI Xiaobo, LI Kang, JIANG Fengjing, et al. Flexible control method of neutral point voltage using improved active compensation technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(29): 111-117.

[12] 陈锐, 陈朵红, 张健, 等. 配电网柔性接地装置电压控制方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 4-10.
CHEN Rui, CHEN Duohong, ZHANG Jian, et al. Research on voltage control method of flexible grounding device in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 4-10.

[13] 郭兆成, 车建涛, 郭启栋, 等. 基于低压配网功率和用电量信息的三相不平衡负荷调整[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 92-101.
GUO Zhaocheng, CHE Jiantao, GUO Qidong, et al. Adjustment of three-phase unbalanced load in distribution network based on its historical power data and power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 92-101.

[14] 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): 134-139.
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): 134-139.

- [15] 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.
- [16] 方恒福, 盛万兴, 王金丽, 等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2185-2193.
FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 138-145.
- [18] WANG W, ZENG X, YAN L, 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.
- [19] 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): 146-154.
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): 146-154.
- [20] 张占龙, 郭民怿, 叶云霞, 等. 配电变压器零序电流治理优化方法及装置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 44-51.
ZHANG Zhanlong, GUO Minyi, YE Yunxia, et al. The governance optimization method and device research of zero-sequence current in distribution transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 44-51.
- [21] WANG P, CHEN B, TIAN C, et al. A novel neutral electromagnetic hybrid flexible grounding method in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(3): 1-1.
- [22] TIAN J, CHEN Q, CHENG L, et al. Arc-suppression coil based on transformer with controlled load[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(8): 644-653.

收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-05-16

作者简介:

王振浩(1964—), 男, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 研究方向为输变电设备运行状态监测与诊断、电能质量综合治理技术等; E-mail: zhenhaowang@126.com

佟林(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量治理技术。E-mail: 444690887@qq.com

(编辑 周金梅)