

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.009

一种新型中性点有源接地补偿系统的建立与实验

陈忠仁, 黄 健, 何业军

(中山职业技术学院, 广东 中山 528404)

摘要: 针对传统的无源消弧线圈不能补偿配电网故障电流的有功分量和谐波分量,无法保证残流在规定范围之内,容易产生弧光接地过电压等问题,设计了一种基于双逆变器的新型中性点有源接地补偿系统。该系统由测控系统和补偿系统构成。在电网正常时,测控系统通过不对称电压法与恒频注入法综合计算得到接地故障电流的基波无功分量与有功分量;在电网发生单相接地后,检测流过中性点的故障电流,利用快速傅里叶算法提取出谐波分量,然后迅速投入补偿系统进行输出补偿。补偿系统主要由双逆变器构成,分别用于补偿接地故障电流中的基波分量、有功分量以及谐波分量,达到故障电流的全补偿、零残流的理想效果。计算机仿真与逆变器实验验证了以上设计的可行性和有效性。

关键词: 中性点; 有源接地; 补偿系统; 实验

Development and Test of a New Neutral Active Grounded Compensation System

CHEN Zhongren, HUANG Jian, HE Yejun

(Zhongshan Polytechnic College, Guangdong Zhongshan 528404, China)

Abstract: A new neutral active grounded compensation system based on dual inverters is developed to solve some problems existing in passive arc-suppression coils, for example, active component and harmonic of grounded fault current are not compensated so that residual current is not limited within the standard range, and arc grounding overvoltage is easy to occur. The system is composed of a measurement and control system and a compensation system. When the distribution network is in normal operation, the fundamental and active component of grounded fault current is to be measured and then calculated out through asymmetric voltage method and constant frequency injection method. When single-phase earthing fault occurs, zero-sequence current at neutral point is detected then its harmonic is calculated out. And the compensation system is quickly switched on to output compensation current. The compensation system is mainly composed of dual inverters, which are used to compensate fundamental, active component and harmonic of grounded fault current, so as to realize the full compensation and the zero residual current and to improve safety level of equipment and power supply reliability of distribution network. The computer simulations and inverter's tests on the system verify its feasibility and effectiveness.

Key words: neutral point; active grounding; compensation system; test

0 引言

国内的中压配电网的中性点多为经消弧线圈接地,这是由于消弧线圈在单相接地发生时,能够输出

感性电流,对接地产生的电容电流进行有效的补偿,使接地点的残流减小到规程允许的范围之内,避免弧光接地过电压的产生,从而保证配电网不因过电压而引发相间短路跳闸,这对提高供电的可靠性和设备运行的安全水平都大有裨益,因此获得了广泛

收稿日期:2015-10-14; 修回日期:2015-11-27

基金项目:中山市科技计划项目(20123A346);中山市高校及事业单位创新发展项目(2014A2FC380)。

Project Supported by Zhongshan Science and Technology Project(20123A346), Innovation and Development Projects of Universities and Institutions in Zhongshan(2014A2FC380).

的应用,但传统的消弧线圈属于无源设备,只能补偿基波无功电流即电容电流。近年来随着电力电子设备的大量应用,以及电缆线路的不断增多,系统在接地时产生的谐波电流和有功电流也随之增加,这部分电流对于无源的消弧线圈来说根本无法补偿,使得残流的水平大大超出了规程允许的范围,容易引起弧光接地过电压的产生,危及配电网可靠的供电和设备的安全^[1-7]。

在配电网的运行实践中业已出现了上述问题。根据文[8]中对某 35 kV 变电站的单相接地电流进行的测试表明,在接地电流的谐波分量中,5 次谐波含量已经占到基波含量的 10%~15%;文[9]指出中国某煤矿在接地发生时,接地电流中有功分量的幅值高达 13.05 A;文[10]指出在消弧线圈补偿良好的情况下,接地残流仍达到 17.2 A,主要包含了 15.7 A 的 5 次谐波以及 6.0 A 的 7 次谐波。这些高次谐波和有功分量大大提高了残流的数值,是导致单相接地故障由于“热因素”和“弧光接地过电压”快速发展为其他事故的主要原因。近年来,为解决这些问题,文[11-15]提出了消弧线圈的有源补偿方案,但大多是对无源消弧线圈的一种局部改造,并不能真正解决接地故障电流中的有功分量和谐波分量的补偿问题,因此文中提出了一种基于双逆变器的新型中性点有源接地补偿系统。

1 一种新型中性点有源接地补偿系统的建立

新型的中性点有源接地补偿系统的构成见图 1。

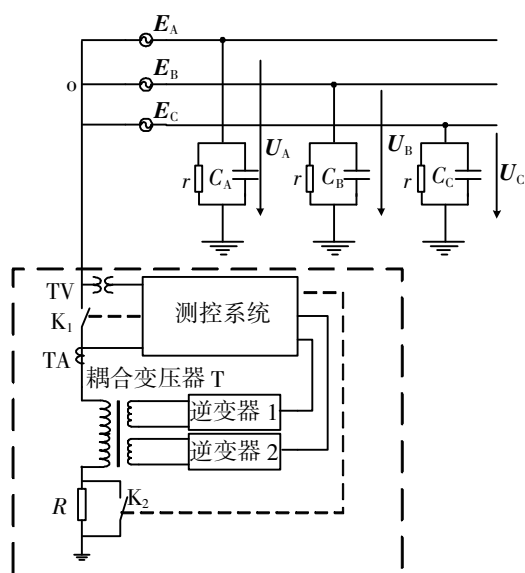


图 1 中性点有源接地补偿系统的构成

Fig. 1 Composition of neutral active grounded compensation system

图 1 中: 虚线框外为中压配电网的一次等值电

路; r 为线路对地泄漏电阻; C 为线路对地电容,而虚线框内即为新型中性点有源接地补偿系统。有源接地补偿系统主要由两大部分组成,即由测控系统和补偿系统(双逆变器)组成。

和其他的有源接地补偿系统相比较,该系统具备以下特点:

1)补偿系统除耦合变压器外,由全电力电子器件构成,对铜铁材料消耗甚少,符合节能减排潮流。

2)补偿系统由双逆变器构成,逆变器 1 补偿配电网接地故障时产生的基波有功分量和无功分量,而逆变器 2 补偿配电网接地故障时产生的谐波分量和逆变器 1 自身产生的谐波分量,由此可使残流达到一个极低的水平,真正实现全补偿和零残流。

3)系统采用全数字化设计,主、从结构,测控系统作为主机,主要完成对接地故障电流基波有功、无功分量以及谐波分量的检测,输出补偿系统由双逆变器构成,作为从机,完成对补偿电流的输出控制。主、从机通过 485 通信进行联系,主机对从机进行控制和查询,并进行电流、电压等数据的传递。

1.1 测控系统的构成与接地故障电流的检测

在图 1 中,测控系统由装设在中性点处的电压互感器 TV、电流互感器 TA 以及以 DSP 为核心的计算机系统构成,测控系统的构成框图见图 2。

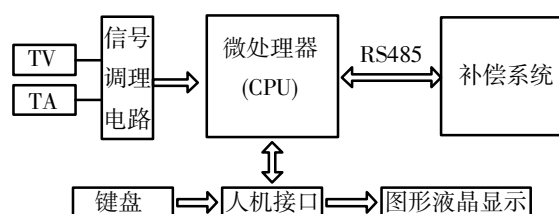


图 2 测控系统构成

Fig. 2 Composition of measurement and control system

TV、TA 和信号调理电路构成前向通道,用于对中性点电压、电流以及谐波电流进行测量。键盘、液晶显示作为人机界面,完成相应的面板操作和数据、图形的显示。通过 RS485 通信,测控系统可完成对逆变器 1、2 的控制以及信息的查询等。而测控系统的核心任务是对配电网接地故障电流基波有功、无功分量(电容电流)以及谐波分量的准确检测,这是控制逆变器准确输出补偿电流的前提条件。通过对各种测量方法的综合比较,文中提出采用不对称电压法与恒频注入法来进行基波有功分量、无功分量的测量和计算。

1.1.1 不对称电压法

由图 1 可知,接于中性点的真空接触器 K_1 ,除了可将有源接地补偿系统退出运行之外,同时可对电容电流的测量发挥作用。当 K_1 断开时,TV 测得的

电网不对称电压 E_0 即为 K_1 断口上的电压。当 K_1 闭合后,TA 测得的即为中性点电流 I_0 ,由此可得零序等值电路见图 3^[16-17]。

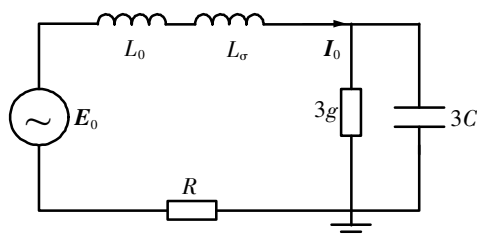


图3 配电网正常时的零序等值电路

Fig. 3 Zero-sequence equivalent circuit of distribution system under normal state

令 $L=L_0+L_\sigma$,三相线路泄漏电阻 $R_0=\frac{1}{3g}$,由图 3 知:

$$\frac{E_0}{I_0} = R + \frac{R_0 \times \frac{1}{j\omega 3C}}{R_0 + \frac{1}{j\omega 3C}} + j\omega L = R + \frac{R_0}{1 + (R_0\omega 3C)^2} + j[\omega L - \frac{R_0^2}{1 + (R_0\omega 3C)^2}]; \quad (1)$$

$$R + \frac{R_0}{1 + (R_0\omega 3C)^2} = \operatorname{Re}[\frac{E_0}{I_0}]; \quad (2)$$

$$\omega L - \frac{R_0^2\omega 3C}{1 + (R_0\omega 3C)^2} = \operatorname{Im}[\frac{E_0}{I_0}]. \quad (3)$$

由于 R, L_0, L_σ 在工频下均为已知,由式(2)、(3)联立求得 R_0 和 $3C$ 后,则系统的电容电流和有功电流也就不难求出。

1.1.2 恒频注入法

在电网正常时,利用从逆变器,通过耦合变压器向电网一次侧注入恒频信号,其注入电流 $i_s(t)$ 可通过安装在中性点的电流互感器 TA 测得。信号注入到一次系统后,通过系统的等效分布电容构成回路。注入信号在接地变压器的零序电感和等效分布电容上产生的压降 $u_{TV}(t)$ 可通过安装在中性点处的电压互感器 TV 测得。与等效分布电容的容抗相比,线路自身感抗很小,可以忽略不计。对图 1 所示的系统进行分析,忽略耦合变压器的激磁阻抗,得到注入信号的零序等值电路见图 4。

图 4 中: $e_s(t)$ 为等效到一次侧的注入信号源; L_0 为接地变压器的零序电感; L_σ 为耦合变压器的漏电感; $3g$ 为三相线路对地的泄漏电导; $3C$ 为三相线路对地的分布电容。 L_0 很小,可以忽略不计,经简化后可得到计算电路见图 5。

由图 5 可得到

$$\frac{I_s}{U_{TV}} = 3g + j\omega_s 3C. \quad (4)$$

$$\text{设 } \omega_s = m\omega_1. \quad (5)$$

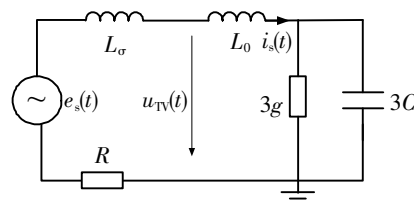


图4 注入信号零序等值电路

Fig. 4 Injected signal zero-sequence equivalent circuit

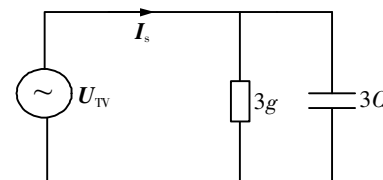


图5 经简化后的计算电路

Fig. 5 Simplify of the circuit for calculation

式(5)中: ω_s 为注入信号角频率; ω_1 为基波角频率; m 为一常数。将式(5)代入式(4)可得

$$\frac{I_s}{U_{TV}} = 3g + jm\omega_1 3C = 3g + jm \frac{1}{X_C}. \quad (6)$$

整理可得

$$3g = \operatorname{Re}[\frac{I_s}{U_{TV}}]; X_C = \frac{m}{\operatorname{Im}[\frac{I_s}{U_{TV}}]}. \quad (7)$$

X_C 与 $3g$ 求出之后,即可求得系统的电容电流和有功电流。此外,注入信号的频率 ω_s 的选取要与电力系统固有的工频和整倍数次谐波频率相区分,为一间谐波信号,且注入频率不能太高,因为频率越高,线路的感抗越大,容抗越小,分布电容测算的误差也越大^[6],文中选取的注入信号频率为 87 Hz。为了减少对电网的干扰,注入信号幅值也不可能做得太大,一般为 2~3 A。

恒频注入法适用于不对称度较小的电网,不对称电压法适用于不对称度较大的电网。对于一个实际的电网,可将恒频注入法与不对称电压法综合起来应用。对于不对称度较小的电网,系统不对称电压 U_{bd} 较小,以恒频注入法测量为主,以不对称电压法测量为辅;对于不对称度较大的电网,系统不对称电压 U_{bd} 较大,以不对称电压法测量为主,以恒频注入法测量为辅。根据所测得的不对称电压大小,对两种方法测得的数据设置不同的权重,然后进行加权平均,如此处理后,则可有效提高电容电流与有功电流的测量精度。

由于接地故障的发生具有随机性和复杂性,在电网中何时何地发生单相接地无法预测,这就导致故障电流中的谐波分量的检测在接地前是无法做到的^[18]。但双逆变器的设计可从另外一个角度提供解决问题的思路:在接地故障发生后,双逆变器暂不投

入, 此时装设在中性点的 TA 检测得到的即为接地故障电流, 利用快速傅里叶算法从中提取出谐波分量, 然后迅速控制逆变器 1 投入以补偿电容电流和有功分量, 再启动逆变器 2 对系统谐波和逆变器 1 产生的谐波进行补偿(逆变器 1 确定后, 其产生的谐波可事先测算得到), 由此可使接地故障电流全部得到补偿。

在利用快速傅里叶算法计算谐波时, 由于接地故障电流所含谐波为单相谐波, 故可将一维信号扩展到二维空间, 定义正交, 利用正交来求出基波分量和各次谐波分量, 可大大加速谐波检测的速度, 缩短采样时间, 具体算法可参考文献[19]。缩短采样时间有利于故障后补偿电流的及时输出。

1.2 补偿系统的构成与控制

补偿系统由耦合变压器、限压电阻、整流单元和双逆变器构成, 见图 6。图 6 中仅画出一路逆变器, 另外一路逆变器设计与之类似。

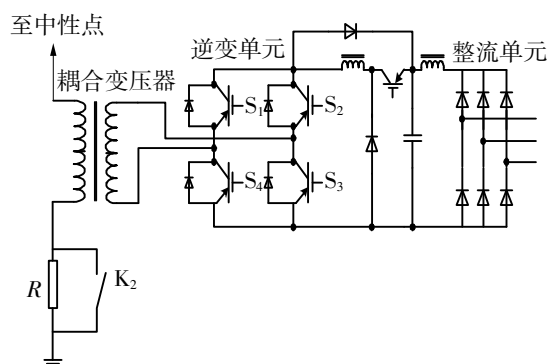


图 6 输出补偿系统构成

Fig. 6 Composition of output compensation system

1.2.1 耦合变压器

耦合变压器串入中性点, 其二次有两个绕组, 可分别接入两台逆变器。逆变器 1 实现故障电流基波有功与无功分量的补偿, 容量较大; 逆变器 2 实现谐波分量的补偿, 容量较小。两个逆变器均内置有 DSP, 作为从机和测控系统(主机)进行通信, 接受测控系统的实时控制。耦合变压器的一、二次绕组的变比为 6 000/600, 主要作用是将逆变器与高压系统隔离开来, 有利于逆变器的长期可靠运行, 并降低了成本。R 为限压电阻, 在测量电容电流时投入, 以限制中性点可能出现的线性谐振过电压, 在单相接地发生时通过 K₂ 的闭合短接而退出。

1.2.2 整流单元电路

采用富士三相整流桥 6RI75G-120, 该整流模块可工作在反向峰值电压 1 200 V, 平均输出电流 75 A。在该电路中输入电压为交流三相 380 V, 整流后输出脉动直流电压的平均值为 514 V。整流单元的作用是为逆变电路提供直流电源, 为减少直流的脉动数, 采用三相不控整流电路。

用是为逆变电路提供直流电源, 为减少直流的脉动数, 采用三相不控整流电路。

1.2.3 逆变单元电路

采用 IPM 模块 PM75DSA120, 输出电压 1 200 V, 电流可达 75 A, 内部集成驱动和保护电路, 使用方便。DSP 产生的 HPWM 信号经光耦隔离后直接驱动 PM75DSA120, 将三相整流后的电流源逆变为相位角、有效值和频率可控的交流电流, 用于补偿接地故障电流的基波有功、无功分量以及谐波分量。IPM 模块的输出电压 1 200 V, 电流可达 75 A, 内部集成驱动和保护电路, 使用方便, 可优化系统的设计。

在中性点有源接地补偿系统的硬件设计完成后, 编制了相应的软件, 其主程序的流程见图 7。

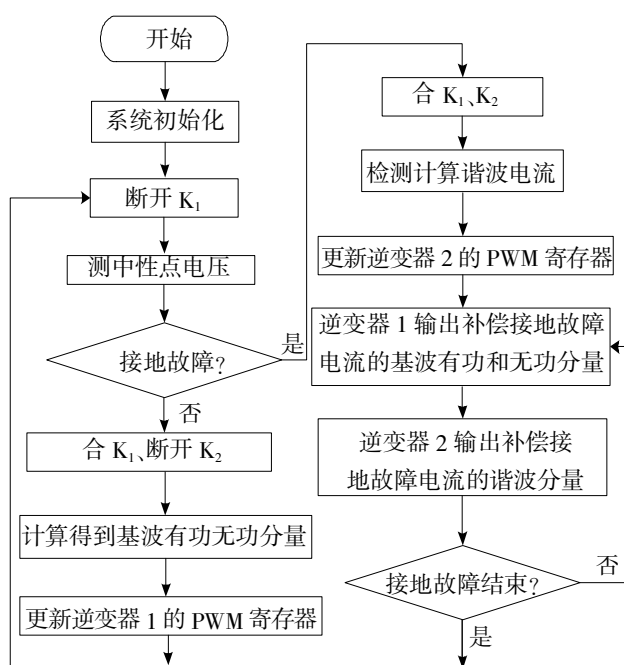


图 7 主程序流程图

Fig. 7 Diagram of main program for the system

2 仿真与实验

利用 MATLAB 提供的 Simulink 仿真工具对中性点有源接地补偿系统进行了仿真^[20]。搭建的仿真系统见图 8。

图 8 中主变压器变比为 35 kV/10 kV, 接线方式为 $\Delta/Y0$, 在中性点通过三绕组耦合变压器分别接入逆变器 1、2。仿真系统的三条出线长度分别为: 150、200、180 km, 对地分布电容为 7.751×10^{-9} F/km, 由此计算得到系统的电容电流为 22.34 A。为了验证中性点有源接地系统的补偿效果, 仿真分以下 3 个步骤: ①双逆变器均不工作, 对故障电流中的基波和各次谐波进行仿真; ②仅逆变器 1 工作, 对故障电流中的基波和各次谐波进行仿真; ③双逆变器同时工作, 对

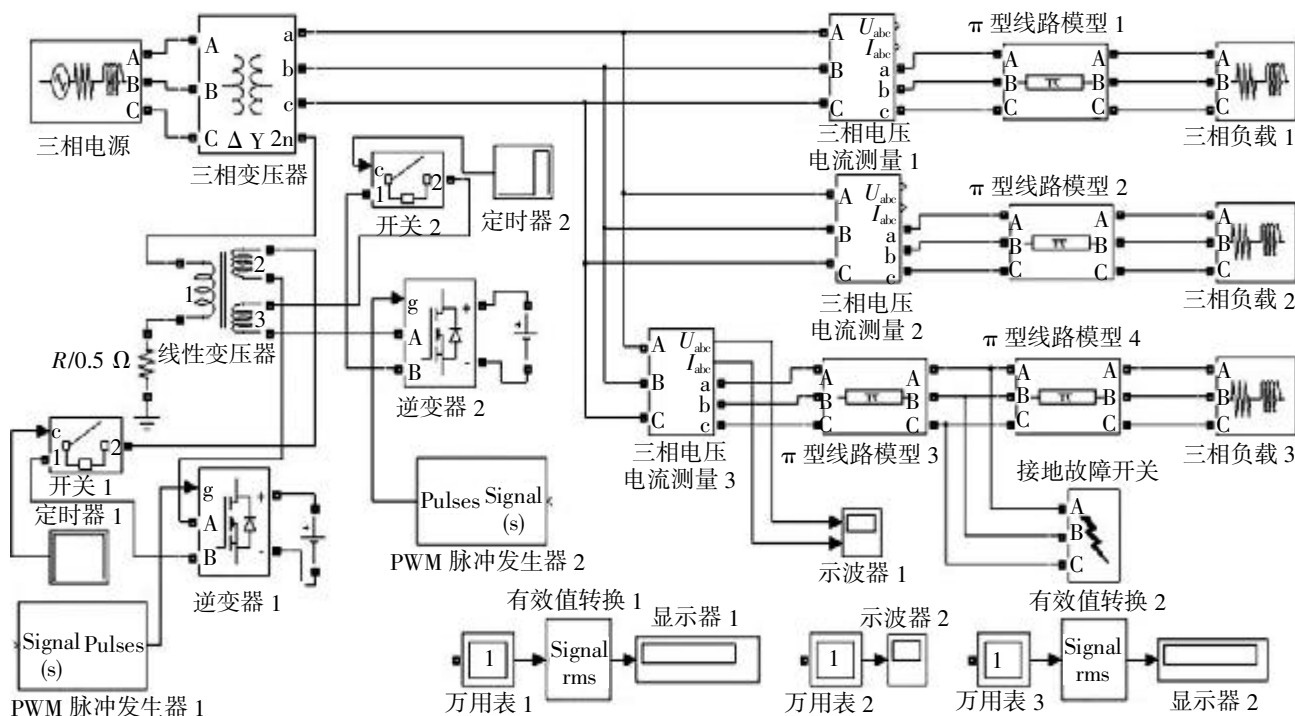


图8 搭建的仿真系统图

Fig. 8 Diagram of simulation system developed

故障电流中的基波和各次谐波进行仿真, 仿真结果分别见图9-11。图9-11中的波形为接地故障电流 I_d (在图10-11中经逆变器补偿后变成残流), 单位为A。

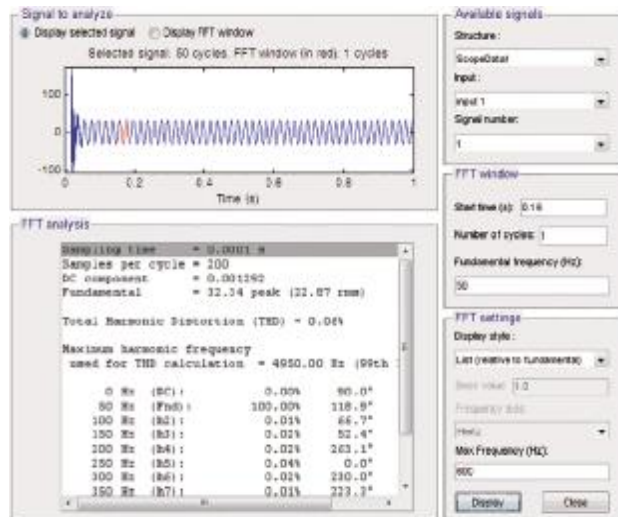


图9 双逆变器均不工作时的故障电流 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis without dual inverters

为更直观地进行比较分析, 将图9-11中的FFT仿真结果的数据做成表1。由表1可知, 双逆变器均不工作时, 系统无补偿电流输出, 接地故障电流即为系统电容电流(基波无功分量), 其有效值为22.86 A (和计算值22.34 A 非常接近); 由于仿真系统中不含非线性元件, 其各次谐波含量甚小, 谐波畸变率仅为0.06%。当逆变器1投入运行后, 经过其补偿, 故障电流中的基波分量已经非常小了(有效值0.305 A), 这说明逆变器1对电容电流具有非常显著的补偿作

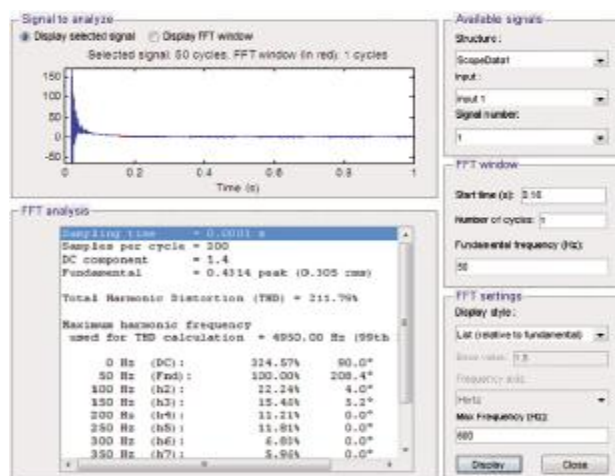


图10 逆变器1工作时的故障电流 FFT 分析

Fig. 10 FFT analysis with inverter No.1

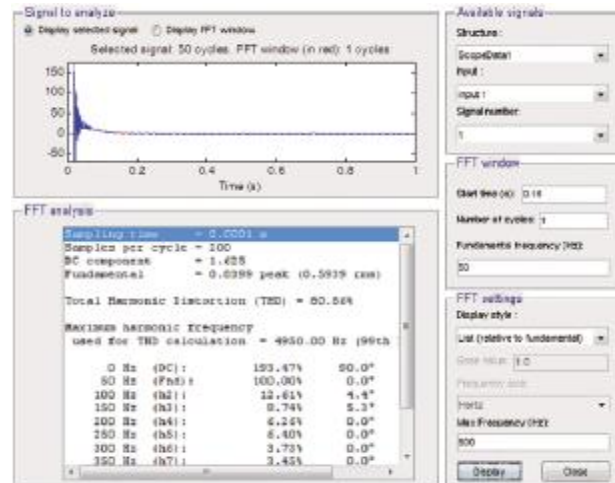


图11 双逆变器均工作时的故障电流 FFT 分析

Fig. 11 FFT analysis with dual inverters

表 1 FFT 仿真数据分析

Table 1 Analysis of FFT simulation main data

逆变器状态	总畸变率 (THD)/%	基波有 效值/A	5 次谐波 含量/%	7 次谐波 含量/%
双逆变器均不工作	0.06	22.860 0	0.04	0.01
仅逆变器 1 工作	211.79	0.305 0	11.81	5.96
双逆变器均工作	87.69	0.593 9	6.40	3.45

用;与此同时,逆变器 1 也不可避免地产生了各次谐波,谐波总畸变率达到了 211.79%。为了抑制逆变器 1 产生的谐波,投入逆变器 2,接地故障电流中的 5、7 次谐波的含量明显降低,谐波畸变率也下降至 80.86%,这验证了逆变器 2 的谐波补偿作用。由此证明,双逆变器的设计,既可补偿故障电流中的基波电流分量,又可补偿故障电流中的各次谐波分量,达到了全补偿的效果。

在中性点有源接地补偿系统研制完成后,在实验室进行了逆变器的输出实验。实验时 PWM 逆变器允许通过的最大电压 600 V,允许通过的最大电流为 20 A。在逆变桥的输入端接入 30 V/5 A 的直流线性电源,使其分别产生 50 Hz(基波)、250 Hz(5 次谐波)、350 Hz(7 次谐波)、550 Hz(11 次谐波),在负载处接入示波器测试输出的电压波形,在驱动电路的高低引脚 HO、LO 处测试 PWM 脉冲波形的输出。所得到的波形分别见图 12~15。

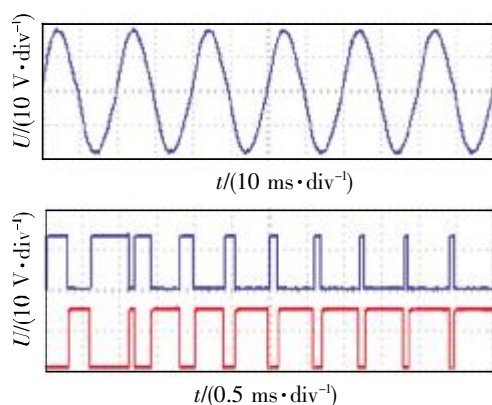


图 12 主电路 50 Hz 波形输出及驱动电路 PWM 波形输出

Fig. 12 50 Hz waveform output of main circuit and PWM waveform output of drive circuit

由图 12~15 可以看出,PWM 逆变器基本上能够输出系统所需的基波与各次谐波,可有效地补偿掉中压配电网在单相接地发生时所产生的基波有功及无功分量以及由于电力电子设备应用而产生的各次谐波之目的。经过有效补偿后,达到所提出的全补偿、零残流的理想效果。

3 结论

在传统的无源消弧线圈不能对接地故障电流中

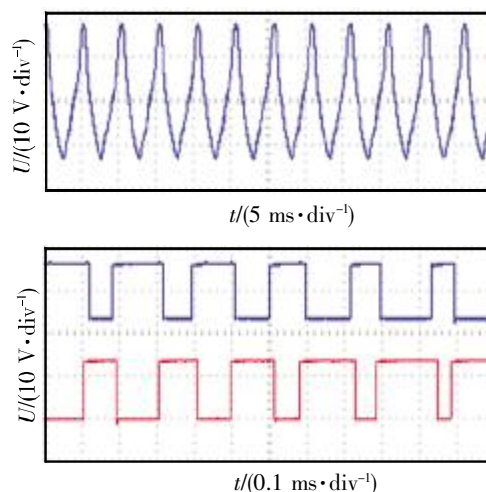


图 13 主电路 250 Hz 波形输出及驱动电路 PWM 波形输出

Fig. 13 250 Hz waveform output of main circuit and PWM waveform output of drive circuit

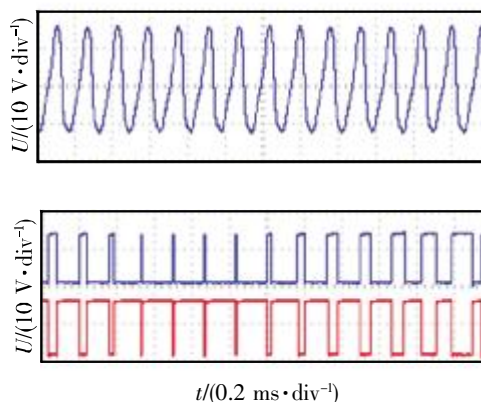


图 14 主电路 350 Hz 波形输出及驱动电路 PWM 波形输出

Fig. 14 350 Hz waveform output of main circuit and PWM waveform output of drive circuit

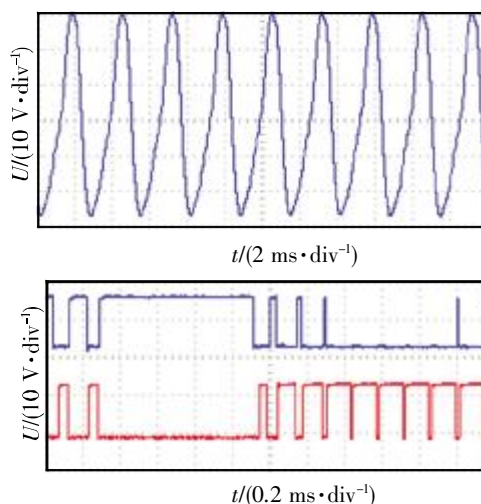


图 15 主电路 550 Hz 波形输出及驱动电路 PWM 波形输出

Fig. 15 550 Hz waveform output of main circuit and PWM waveform output of drive circuit

日益增大的谐波及有功分量进行补偿,导致残流难以控制在规定范围之内,设计了一种新型中性点有源接地补偿系统,主要由测控系统和补偿

系统构成。测控系统在电网正常时利用不对称电压法和恒频注入法,实现了对系统接地故障电流中有功、无功分量的准确测量;通过故障后对配电网接地故障电流中所含谐波的检测,计算得到谐波分量。补偿系统主要由双逆变器构成,逆变器1实现了对接地故障电流的基波有功、无功分量的补偿输出,逆变器2实现了对接地故障电流与逆变器1产生的谐波分量的补偿输出,从而实现了接地故障电流的全补偿,使残流达到了一个极低的水平。计算机仿真与逆变器实验验证了系统的可行性、有效性。通过进一步完善,有望达到实用化水平。

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,2001.
- [2] 候妙兴. 接地电流中有功分量和高次谐波对电网的影响[J]. 高电压技术,1999,25(4):61-63.
HOU Miaoxing. The effect of active component and high order harmonics of neutral current on distribution network operation[J]. High Voltage Engineering, 1999,25(4):61-63.
- [3] 吴茜,蔡旭,徐波. 具有两级磁阀的消弧线圈关键参数设计[J]. 电工技术学报,2011,26(10):224-226.
WU Xi, CAI Xu, XU Bo. Design of key parameters about two-stage magnetic valve arc-suppression coil [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2011,26 (10): 224-226.
- [4] 徐铮,袁振海,李春. 调匝式消弧线圈调谐原理的新研究[J]. 电气应用,2008,27(10):57-60.
XU Zheng, YUAN Zhenhai, LI Chun. Further study of automatically tuning principle of multi-tap arc-suppression [J]. Electro technical Application, 2008,27(10):57-60.
- [5] 张松,孙伟,陈文针. 消弧线圈自动调谐的研究[J]. 高压电器,1999,35(2):3-7.
ZHANG Song, SUN Wei, CHEN Wenzhen. Studies on automatic resonant regulation of peterson coil[J]. High Voltage Apparatus, 1999,35(2):3-7.
- [6] 程骏,陈柏超,皇甫成. 基于信号注入法的TSC消弧线圈动态调谐接地装置[J]. 高压电器,2006,42(1):63-65.
CHENG Jun, CHEN Baichao, HUANGPU Cheng. Automatic tuning TSC arc-suppression coil grounding device based on signal injection[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1):63-65.
- [7] 闫静,马志瀛. 自动补偿消弧装置新型测控方法的研究及其实现[J]. 高压电器,2007,43(3):165-168.
YAN Jing, MA Zhiying. Development and realization of a new measure-control method for automatic compensation arc-suppression equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2007,43(3):165-168.
- [8] 万善良. 上海市区配电网络中性点接地方式的技术分析[J]. 上海电力,2006,11(1):46-53.
WAN Shanliang. Technology analysis of shanghai urban distribution network neutral point grounding mode [J]. Shanghai Electric Power, 2006, 11(1):46-53.
- [9] 李晓波,刘建华,牟龙华,等. 6~10 kV 配电网微机型电容电流测试仪的研制[J]. 高电压技术,2007,33(3):99-103.
LI Xiaobo, LIU Jianhua, MU Longhua, et al. Measurement system of capacitive current for 6~10 kV distribution network based on microcomputer[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(3):99-103.
- [10] 金百荣,李电. 电网谐波对消弧线圈接地系统的影响[J]. 高压电器,2009,45(4):89-92.
JIN Bairong, LI Dian. The impact of power grid harmonics on grounding system of arc-suppression coil[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(4):89-92.
- [11] 程路,陈乔夫,张宇,等. 变压器负载可控的新型自动调谐消弧线圈[J]. 高电压技术,2007,33(6):50-54.
CHENG Lu, CHEN Qiaofu, ZHANG Yu, et al. Novel automatic tuning arc-suppression coil using transformer with controllable load [J]. High Voltage Engineering, 2007,33 (6):50-54.
- [12] 董一脉. 有源全补偿消弧控制的研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2007.
- [13] 丛伟,李盼盼,李洪涛,等. 基于恒频注入信号的消弧线圈自动跟踪补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):185-189.
CONG Wei, LI Panpan, LI Hongtao, et al. Automatic arc suppression coil compensation technology based on fixed-frequency signal injection method[J]. Power System Protection and Control, 2010,38(19):185-189.
- [14] 何锡祺,齐郑,杨以涵,等. 并联电抗器组合式消弧线圈的研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):92-96.
HE Xiqi, QI Zheng, YANG Yihan, et al. Research on combined arc suppression coil with shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 92-96.
- [15] 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):133-137.
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): 133-137.
- [16] 曲轶龙,董一脉,谭伟璞,等. 基于单相有源滤波技术的新消弧线圈的研究[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.
- [17] 陈忠仁,吴维宁,陈家宏. 配电网自动消弧装置的测量跟踪问题[J]. 电力系统自动化,2004,28(10):85-87.

(下转第68页)

- TONG Xuefang, WANG Haitao, CHEN Jiahong, et al. Analysis of correlation between cloud-to-ground flash density map using LLS and lightning flashover[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2924-2929.
- [7] 罗毅, 王剑, 刘亚新, 等. 雷电定位监测系统在输电线路防雷中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 173-176.
- LUO Yi, WANG Jian, LIU Yaxin, et al. Location and monitoring system in prevention of lightning faults of transmission line[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 173-176.
- [8] 李家启, 王劲松, 廖瑞金, 等. 重庆库区地貌 1999—2008 雷电流幅值频率分布特征[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1123-1128.
- LI Jiaqi, WANG Jinsong, LIAO Ruijin, et al. Distribution characteristics of the lightning current amplitude and frequency in Chongqing reservoir landform during 1999—2008[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1123-1128.
- [9] 高磊, 潘解祥. 城区与郊区不同地形地貌下云地闪分布规律初步研究[J]. 气象科技, 2009, 37(6): 729-733.
- GAO Lei, PAN Jiexiang. Distribution regularities of cloud-to-ground lightning flashes in urban and rural landforms[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(6): 729-733.
- [10] 李家启, 申双和, 廖瑞金, 等. 重庆地区雷电流幅值变化特征分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2918-2923.
- LI Jiaqi, SHEN Shuanghe, LIAO Ruijin, et al. Analysis of the lightning current amplitude change characteristics in Chongqing area[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2918-2923.
- [11] 李永福, 司马文霞, 陈林, 等. 基于雷电定位数据的雷电流参数随海拔变化规律[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1634-1641.
- LI Yongfu, SIMA Wenxia, CHEN Lin, et al. Law between parameters of lightning current and elevation based on lightning detection data[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1634-1641.
- [12] 钟连宏, 常美生. 不同土壤电阻率对雷电放电过程的影响[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 64-66.
- ZHONG Lianhong, CHANG Meisheng. Study on the effect of soils with various resistivities on lightning process[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 64-66.
- [13] 申元, 王磊, 马御棠, 等. 海拔高度对云南某地雷电参数的影响[J]. 电力建设, 2012, 33(4): 35-37.
- SHEN Yuan, WANG Lei, MA Yutang, et al. Effects of elevation on lightning parameters in yunan province[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(4): 35-37.
- [14] 陆国俊, 熊俊, 陈家宏, 等. 广州地域 1999—2008 年地闪密度图及雷电参数分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2930-2936.
- LU Guojun, XIONG Jun, CHEN Jiahong, et al. Analysis of ground flash density and lightning parameters of Guangzhou in 1999—2008[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2930-2936.
- [15] 陈家宏, 童雪芳, 谷山强, 等. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1893-1897.
- CHEN Jiahong, TONG Xuefang, GU Shanqiang, et al. Distribution characteristics of lightning current magnitude measured by lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1893-1897.
- [16] 陈家宏, 童雪芳, 冯万兴, 等. 1 000 kV 皖电东送输变电工程沿线的雷电分布特征[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 62-67.
- CHEN Jiahong, TONG Xuefang, FENG Wanxing, et al. Lightning distribution characteristics along the corridor of 1 000 kV Anhui-Shanghai transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 62-67.
- [17] 孟晨, 李岩, 解江伟, 等. 雷电冲击下变压器等值电路电感参数的计算与分析[J]. 变压器, 2013, 50(4): 29-30.
- MENG Chen, LI Yan, XIE Jiangwei, et al. Calculation and analysis of inductance parameters of transformer equivalent circuit under lightning impulse[J]. Transformer, 2013, 50(4): 29-30.
- [18] 孙继松, 舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 311-320.
- SUN Jisong, SHU Wenjun. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2007, 31(2): 311-320.
- 李瑞芳(1980—), 女, 博士, 讲师, 从事高电压与绝缘技术方向的研究工作。
- 曹晓斌(1974—), 男, 博士, 硕士生导师, 从事高电压与绝缘技术方向的研究工作。

(上接第 62 页)

- CHEN Zhongren, WU Weining, CHEN Jiahong. Measuring and tracing of automatic arc-suppression devices in distribution networks[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(10): 85-87.
- [18] 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.
- [19] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [20] 林飞, 杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- 陈忠仁(1971—), 男, 副教授, 主要从事消弧线圈与接地选线技术的研究。
- 黄健(1967—), 男, 高级实验师, 研究方向为电气自动化技术。
- 何业军(1982—), 男, 讲师, 研究方向为电气自动化技术。