

基于T形连接变压器中性线电流抑制的新方法

随着居民单相负载比重的加大，在三相四线制低压配电网系统中，由于三相不对称负载和非线性负载能产生零序分量电流，引起中性线过载问题越来越严重。采用一种新的中性线电流抑制方法，在靠近负载端接入一种新型变压器——T形连接变压器，对中性线电流具有良好的抑制作用。对T形连接变压器抑制中性线电流的原理进行了详细地分析研究，并给出了其主要参数的确定方法，最后用仿真软件Matlab/Simulink对所做分析进行了仿真验证，证明使用T形连接变压器对中性线电流进行抑制是可行的。

吴 杰 梁志超 樊雅青 郑 拓/燕山大学电气工程学院



吴 杰/教授

关键词/Keywords

T形连接变压器 ·
三相四线 ·
不对称负载 ·
中性线电流 ·
谐波电流抑制 ·

随着现代社会用电需求的增大及各种负载的出现，日常生活中的电能质量问题也越来越受到人们的重视。在三相四线制低压配电系统中，由于大量非线性负载的存在，如各种整流设备、变频器、节能灯、荧光灯和UPS电源等，极易造成三相负载的不平衡，使电网电流含有大量谐波成分，这些谐波成分通常为3、5、7和9次等谐波电流，对电力系统造成了严重污染^[1]。值得提及的是，无论三相负载平衡与否，当三相电流不对称或含有谐波，由对称分量法，可得到三相电流的零序分量为三个同相位、等幅值的量，在带有中性线的系统中，三相的零序分量在中性线上累积，极易超过电能质量的标准要求，造成中性线过电流，轻则降低供电质量、降低输电线路以及各种用电设备寿命，重则导致中性线严重发热，甚至烧毁引发火灾^[2]。

抑制零序电流的方法有多种，如在系统中接入无源滤波装置，这种方式接线简单，成本较低，但容易引起特定次

谐波的谐振^[3]。对应无源滤波装置的为有源滤波装置，这种设备的滤波效果与实时控制性比其他滤波方式难以企及的，但其电路拓扑复杂，并且需要复杂的控制电路，成本极高^[4-6]。有文献指出用曲折形连接或星形/三角形联结变压器及星形/六角形联结变压器，可以单独抑制中性线中叠加的零序电流，相比上述两种方法，具有接线简单、成本低、无复杂控制并且不会与系统产生谐振等优点^[7-9]。

本文采用T形连接变压器来对系统中性线上叠加的零序电流进行单独抑制，相比曲折形及星形/三角形联结变压器，少用一台单相变压器，有效降低了成本^[10-12]。本文对该种T形连接变压器的原理及参数设计进行了详细分析，并对其在三相电压不平衡时的滤波效果做了简要分析，指出了相应的不足之处，并加以优化。最后用Matlab仿真软件进行了仿真验证，结果表明该方法可以很好地抑制流过中性线的电流。

T形连接变压器抑制零序电流的原理及其参数确定

根据电流阻抗分配定律，如果在靠近负载侧接入一个并联支路，并且该并联支路有以下特点。

- 1) 该支路仅对零序电流分量呈低阻抗，而对正负序电流分量呈高阻抗。
- 2) 该并联支路的零序阻抗远小于系统电网侧及中性线回路的零序阻抗。

则此时由负载侧引起的绝大部分零序电流分量将会经过该并联支路流回负

载端，从而对电网侧及中性线的零序电流起到抑制作用。由负载侧引起的零序分量等效电路如图1所示。

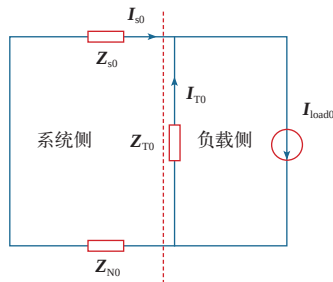


图1 由负载侧引起的零序分量等效电路

图1中系统侧及中性线零序阻抗为 $Z_{s0} + Z_{N0}$ ，并联支路零序阻抗为 Z_{T0} 。由电流阻抗分配定律

$$I_{T0} = \frac{Z_{s0} + Z_{N0}}{Z_{s0} + Z_{N0} + Z_{T0}} I_{load0} \quad (1)$$

$$I_{s0} = \frac{Z_{T0}}{Z_{s0} + Z_{N0} + Z_{T0}} I_{load0} \quad (2)$$

由于 $Z_{s0} + Z_{N0} \gg Z_{T0}$ ，因此 $I_{T0} \gg I_{s0}$ ，即负载侧产生的绝大部分零序电流分量将通过 Z_{T0} ，而不流通过中性线及电网系统侧。本文将运用T形连接变压器作为这条并联支路，实现对中性线电流的抑制。

T形连接变压器由两台单相变压器特殊连接组成，其中一台为三绕组型，另一台为双绕组型，其连接方式如图2所示。

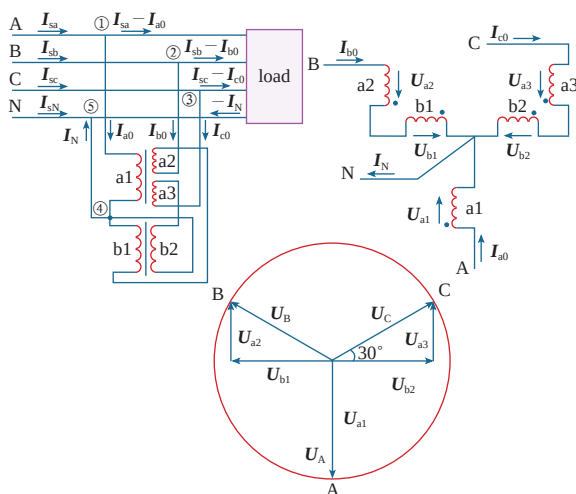


图2 T形连接变压器接线图及电压矢量关系

原理分析：如图2所示，若不接该变压器，负载端产生的零序电流 I_{a0} 、 I_{b0} 和 I_{c0} 将在中性线叠加，

与整个系统形成回路。接入该变压器，由于其一次与二次磁通相互抵消，使变压器绕组仅对零序分量电流呈低阻抗，进而使零序分量电流在变压器与负载间形成回路，有效地抑制了中性线零序电流。由此看出，T形连接变压器接入点离负载端越近越好。

下面对T形连接变压器抑制中性线零序电流的参数设计进行分析。

由对称分量法

$$\begin{cases} I_{sa} = I_{sa+} + I_{sa-} + I_{sa0} \\ I_{sb} = I_{sb+} + I_{sb-} + I_{sb0} \\ I_{sc} = I_{sc+} + I_{sc-} + I_{sc0} \end{cases} \quad (3)$$

由此得到的三相中的零序分量，是三个同相位、等幅值的量，即

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} \quad (4)$$

故当中性线电流 I_{sN} 不加任何抑制措施时，有

$$I_{sN} = I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} \quad (5)$$

因此，若设电网侧电流为 I_{sa} 、 I_{sb} 和 I_{sc} ，且T形连接变压器参数已满足补偿条件，则由零序分量而形成的中性线电流 I_{sN} 将经变压器绕组，流回负载端，电网侧电流将只含有正序分量和负序分量，从而使 $I_{sN} = 0$ （若为理想变压器），电流流向关系参见图2。要满足该种电流流向，只有当接入的T形连接变压器仅对零序分量电流 I_{a0} 、 I_{b0} 和 I_{c0} 呈现低阻抗通路才可实现。

故设三绕组变压器一、二次线圈匝数分别为 W_1 、 W_2 和 W_3 ，双绕组变压器一、二次线圈匝数分别为 N_1 、 N_2 ，当变压器绕组仅对零序分量电流呈低阻抗通路时，由磁动势平衡原理

$$\begin{cases} I_{a0} W_1 = I_{b0} W_2 + I_{c0} W_3 \\ I_{b0} N_1 = I_{c0} N_2 \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)、式(6)可知

$$\begin{cases} W_1 = W_2 + W_3 \\ N_1 = N_2 \end{cases} \quad (7)$$

即双绕组变压器电压比为 $N_1 : N_2 = 1 : 1$ 。

故双绕组变压器一、二次绕组电压

$$U_{b1} = -U_{b2} \quad (8)$$

设A、B和C三相电压平衡，根据三绕组变压器一、二次绕组电压相位关系，以及T形连接变

器在电网的接入方式,有

$$\begin{cases} U_A = U_s \angle 0^\circ = U_{a1} \\ U_B = U_s \angle -120^\circ = U_{a2} + U_{b1} \\ U_C = U_s \angle 120^\circ = U_{a3} + U_{b2} \\ U_{b1} = -U_{b2} \end{cases} \quad (9)$$

故可得到变压器绕组电压与三相电压间的矢量关系图,如图2所示。故

$$U_{a2} = U_{a3} = -\frac{1}{2}U_{a1} \quad (10)$$

因此三绕组变压器电压比 $W_1:W_2:W_3=2:1:1$ 。

若线电压有效值为380 V,则根据所求电压比关系及相量图,有

$$\begin{aligned} |U_{a1}| &= |U_A| = |U_B| = |U_C| = \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V} \approx 220 \text{ V} \\ |U_{a2}| &= |U_{a3}| = \frac{1}{2} \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V} \approx 110 \text{ V} \\ |U_{b1}| &= |U_{b2}| = \cos 30^\circ \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V} = 190 \text{ V} \end{aligned} \quad (11)$$

故两个变压器参数分别为:220/110/110 V, 190/190 V。

运用Matlab进行仿真分析

1. 三相负载平衡

对于典型的建筑物配电系统,由轻微的不对称负载造成的很小的中性线电流不会有问题,但即便是三相负载完全对称,当含有大量非线性负载时,也可能产生较大的中性线电流^[13]。设电网电压对称,当三相负载为平衡负载时,三相电路对称。对称三相电流的谐波也是三相对称的,此时3的倍数次谐波为零序谐波。因此,流经中性线的零序分量电流主要是由3的倍数次谐波组成的零序谐波。设置三相对称负载为一组三相不控整流器,一组三相阻感负载并联,每相再并联单相整流器,用Matlab进行仿真。

设系统电感0.1 mH,在线电压380 V下测得基波电流有效值为566.6 A,3次零序谐波电流有效值为54.45 A,3次谐波含有量为9.61%。由于T形连接变压器中三绕组变压器额定电压为220 V,双绕组变压器额定电压为190 V,故可得三绕组变压

器及双绕组变压器额定容量分别为: $S_{T3} = E_{a1}I_{a0} = 220 \text{ V} \times 54.45 \text{ A} = 11\,979 \text{ V} \cdot \text{A}$, $S_{T2} = E_{b1}I_{b0} = 190 \text{ V} \times 54.45 \text{ A} = 10\,345.5 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。

每台变压器饱和度按80%设计,则容量应选取为:15 kV·A, 220/110/110 V; 13 kV·A, 190/190 V。即T形连接变压器总容量为28 kV·A。

接入T形连接变压器前后,电网电流和中性线电流波形如图3所示,其中, I_{sa} 为电网电流波形, I_{sN} 为中性线电流波形。通过计算得到未接入T形连接变压器时,电网中3次零序谐波电流大小为54.45 A,中性线电流有效值约为171 A,该值约为每相中3次零序谐波电流的3倍(稍大于3次谐波3倍是由于零序电流中还含有少量其他3的倍数次谐波,如9、15次谐波等,这里电流值只计算含有量较大的3次谐波)。而接入变压器后,中性线电流峰值由200 A降到30 A,抑制作用明显。

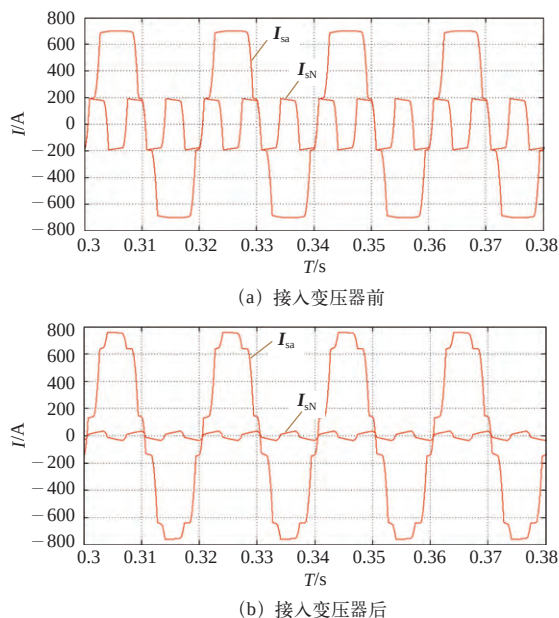


图3 接入T形连接变压器前后电流波形

电网电流 I_{sa} 谐波分析如图4所示。由频谱图可以看出,接入变压器前3次谐波含有量为9.61%,接入后约为1.33%,电网电流中的3、9和15次等(6K-3)次零序谐波得到了明显消除。

综上所述,在三相负载平衡的情况下,T形连接变压器不仅能抑制中性线电流,对电网电流中的3K次谐波还有一定的滤波作用。

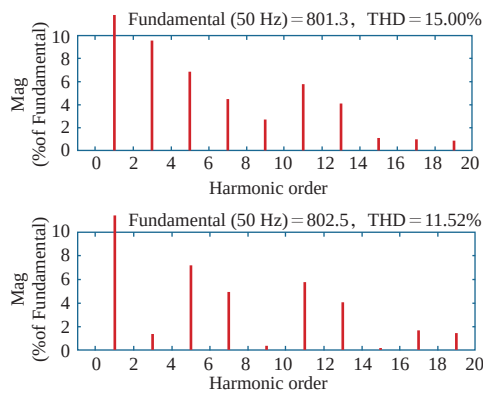


图4 接入T形连接变压器前后谐波频谱图

2. 三相负载不平衡

设电网电压对称, 当三相负载不平衡时, 三相负载电流将不对称, 而对于不对称三相电路, 其谐波通常也是不对称的, 此时无论是 $3K$ 次谐波、 $(3K+1)$ 次谐波, 还是 $(3K-1)$ 次谐波, 其中均可能包含正序分量、负序分量和零序分量^[14]。此时, T形连接变压器将仅具有抑制中性线电流的作用, 而不具有滤除电流中 $3K$ 次谐波作用。设置三相负载为不平衡负载, A相接单相整流器, B相接纯电阻负载, C相接阻感负载, 用Matlab进行仿真。

仿真波形如下: 图5a~c为三相电网侧电流, 图5d为中性线电流。0.25 s时刻前, 未接入T形连接变压器, 中性线电流 I_{sN} 很大, 峰值可达100 A, 电

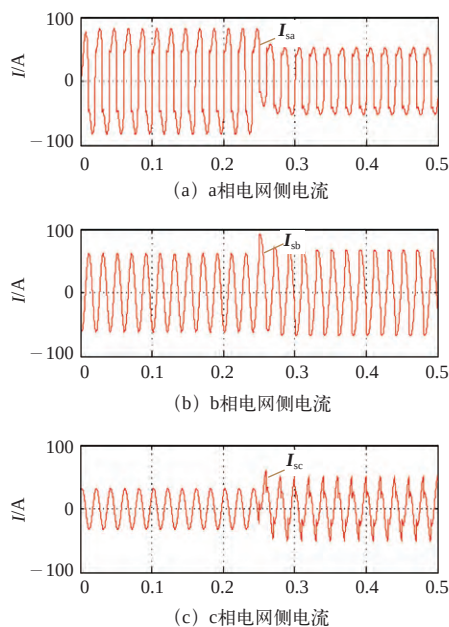
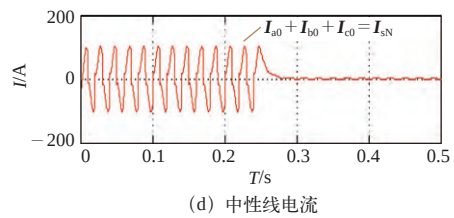


图5 电流仿真波形

网中三相电流除了正序分量、负序分量, 也包含零序分量。0.25 s时刻, 接入T形连接变压器, 这时中性线电流明显减小, 电网电流也发生变化, 滤除了零序分量, 而只含有正序分量与负序分量之和。

下面验证流过T形连接变压器绕组的电流确实为零序分量电流, 如图6所示。可见在0.25 s时刻T形连接变压器接入后绕组中流过的电流 I_{Ta} 、 I_{Tb} 和 I_{Tc} 为三个相位幅值都相等的量, 即

$$I_{Ta} = I_{a0} = I_{Tb} = I_{b0} = I_{Tc} = I_{c0}$$

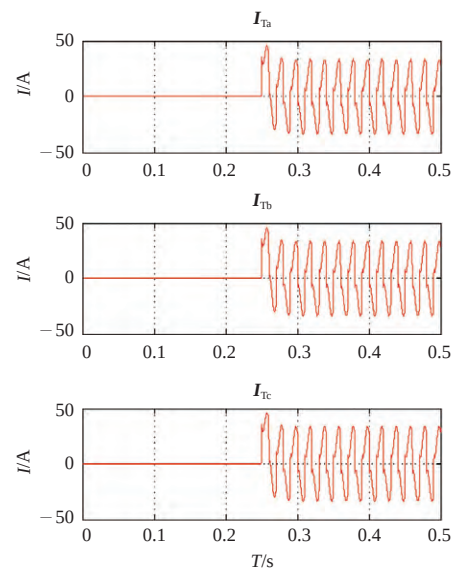


图6 T形连接变压器绕组中的电流

由于A相接的是非线性负载, 下面对A相电流进行谐波分析来观察T形连接变压器对 $3K$ 次谐波的滤波情况。0.25 s接入T形连接变压器前的A相电流谐波分析频谱如图7a所示, 0.25 s接入T形连接变压器后的谐波分析如图7b所示。可以看出, 总谐波畸变率几乎没有变化, $3K$ 次谐波含有量也几乎没有变化, 只是基波的幅值由89.02 A降低为60.18 A, 这是因为其零序分量经T形连接变压器得到了抑制的

结果。

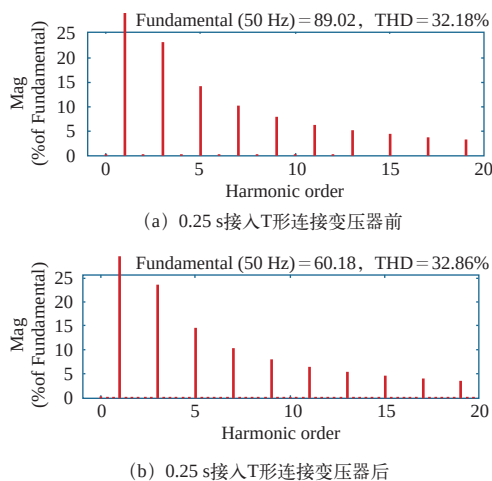


图7 A相电流谐波频谱图

三相电压不对称对T形连接变压器抑制中性线电流的影响

由于T形连接变压器在整个系统对零序电流为低阻抗的通路,故当三相电压不平衡时,系统中电源产生的基波零序成分,也会经T形连接变压器流至中性线与电源侧形成回路,造成T形连接变压器中电流过大,大大降低T形连接变压器对中性线电流的抑制效果。零序基波等效电路如图8所示。

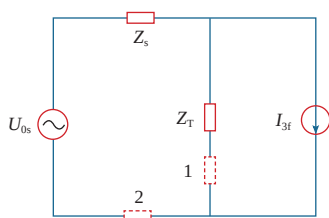


图8 零序基波等效电路

为解决这类问题,可在T形连接变压器接中性线侧(见图8位置1,见图2节点④~⑤之间)加入一组串联LC滤波器,使其对基波呈高阻抗,而对3次谐波呈低阻抗,在中性线位置(见图8位置2,见图2节点⑤~N之间)也加入一组串联LC滤波器,使其对基波呈低阻抗,而对3次谐波呈高阻抗^[15]。

下面对三相电压不对称的情况进行仿真。在三相电压源中注入3%的零序基波电压,三相电压

有效值分别为226 V、216.2 V和216.2 V。接入LC滤波器前后,电网电流与中性线电流如图9所示。

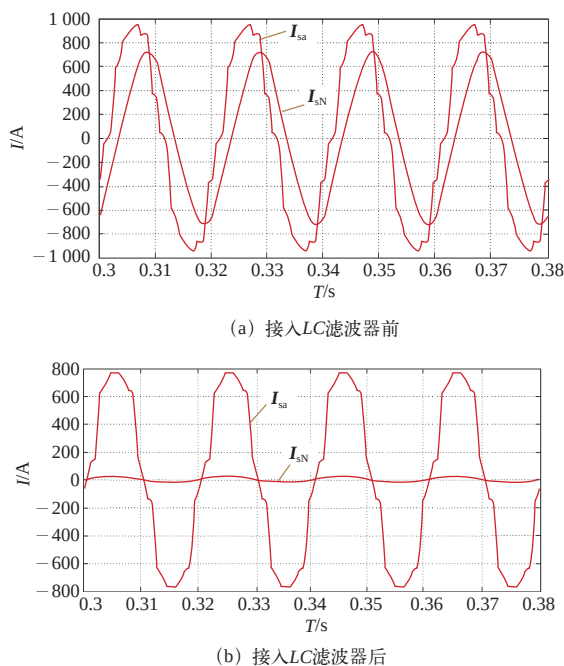


图9 接入LC滤波器前后电流波形

从波形中可以看出,接入LC滤波器前,中性线电流 I_N 在0.02 s内只有一个周波,而且幅值很大,说明电网中的零序基波电流通过T形连接变压器叠加流入了中性线,有效值达495 A,因此必须采取措施对其进行抑制。而加装LC滤波器后的中性线电流明显降低,峰值大小约为20 A,有效值约14 A。

结束语

在三相四线制低压配电系统中,对于解决因零序分量电流在中性线上叠加导致其过电流的现象,本文运用T形连接变压器,提出了一种较为新颖的方法。并对其滤波原理以及详细参数的设计进行了分析。指出了其在三相电压不平衡的情况下存在的缺陷,并提出了解决方案。最后通过Matlab/Simulink仿真,验证了方案的可行性。得到了以下结论。

1) 在三相电压对称情况下,当三相负载平衡,T形连接变压器不仅可以抑制中性线电流,同时可以滤除电网中的3K次谐波电流。当三相负载

不平衡, T形连接变压器将仅有抑制中性线电流作用而不具有滤除3K次谐波作用。但无论三相负载平衡与否, 其功能本质均是通过对零序分量电流提供低阻抗通路来实现。

2) 当三相电网电压不平衡时, 由于系统电源中本身存在零序基波成分, 而T形连接变压器对零序电流呈低阻抗, 使系统侧零序基波电流在中性线上叠加, 导致T形连接变压器抑制中性线电流的效果明显变差, 但通过加装两组LC滤波器, 使得在该种情况下, T形连接变压器对抑制中性线电流依然可以取得良好的效果。

3) 若仅仅为了不使中性线超负载, 那么变压器法抑制中性线电流的性价比显然不如增大中性线截面积高, 但从零序电流对电网侧电流不对称度的影响来看, 仅仅增大中性线截面积并不能起到抑制零序电流的作用。因此, 在已经建完且对三相对称性要求较高的配电系统, 采用这种方法将有更好的效果, 并且可以省去更多繁琐的施工过程。在此种情况下, T形连接变压器法不失为一种选择手段。

参考文献

- [1] 周名嘉, 杨松. 零序谐波滤波器解决中性线电流超载的原理 [J]. 建筑电气, 2008, 27 (5): 13-16.
- [2] 邓占锋, 朱东起, 姜新建. 三相四线制下中线谐波电流治理的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2001 (4): 15-19.
- [3] 康明才, 黄锦安. 三相四线制电路中线谐波电流的抑制 [J]. 继电器, 2007 (S1): 441-443.
- [4] 王轩, 姜新建, 朱东起. 治理三相四线制配电网谐波电流的新技术 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (15): 44-52.
- [5] 孙建军, 查晓明, 丁凯, 等. 一种低耐压中性线谐波治理电路原理及实现 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (18): 34-37.
- [6] 张方华, 丁勇, 王慧贞, 等. 四桥臂三相逆变器的特定谐波消除控制 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (7): 82-87.
- [7] Yash Pal, Swarup A, Bhim Singh. A comparative analysis of three-phase four-wire UPQC topologies [C]. New Jersey: IEEE Computer Society, 2010.
- [8] 李国栋, 冯力鸿, 顾强, 等. 曲折接线变压器抑制零序三次谐波电流方法研究 [J]. 现代电力, 2006, 23 (6): 40-44.
- [9] 李阳春. 一种新型零序电流滤波装置的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (7): 91-93.
- [10] Bhim Singh, Jayaprakash P, Kothari D P. A t-connected transformer and three-leg VSC based DSTATCOM for power quality improvement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23 (6): 2710-2718.
- [11] Deepthi Janyavula, Dr S N Saxena. Study of fast acting DSTATCOM with star/delta and t-connected transformer for power quality improvement [C]. New Jersey: IEEE Computer Society, 2011.
- [12] Cogbill Bell A, Hetrick John A. Analysis of T-T connections of two single-phase transformers [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87 (2): 388-394.
- [13] 饶玲娜. 中性线谐波电流治理研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [14] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 16-17.
- [15] 伏祥运, 赵明, 姚钢. 一种新型中性线电流抑制方法的研究 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (5): 80-82.

(收稿日期: 2014-07-14) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告