

基于星形三角形接线多功能平衡变压器的负序 和谐波综合治理系统

张志文,陈明飞,胡斯佳,李 勇,王 丹,姜 鹏

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 基于各种单相用电场合供电系统中普遍存在的负序和谐波问题,提出了一种负序和谐波综合治理系统。该系统由星形三角形接线多功能平衡变压器(可实现三相变两相和三相变三相)、三相全桥型有源功率调节器等组成。系统充分利用了平衡变压器的平衡潜能,使得有源功率调节器的容量得以降低,且电压等级灵活可调,降低了装置成本,可实现负序、谐波和无功的综合治理功能。阐述了系统补偿原理及检测控制方法。对系统在负载不平衡以及负载波动 2 种工况下进行了仿真和试验研究,结果证明了补偿原理及检测方法的正确性。
关键词: 负序电流;谐波电流;星形三角形接线多功能平衡变压器;三相全桥型有源功率调节器;谐波分析;变压器

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.027

0 引言

随着近年来我国单相负荷的装机容量不断增大,经单相负荷变电所渗透至公共电网的负序、谐波和无功不断增加,严重威胁公共电力系统的安全稳定运行,污染点周围电力用户也因此无法正常生产和生活,这引起了相关工业部门和学者的广泛关注^[1]。

考虑到经济性,为求得电力系统的平衡,我国多数大功率单相负荷的供电系统的进线均采用了相序轮换技术。但对于山区、高原等电网相对薄弱地区的单相负荷供电系统,该方法难以满足国家标准对公共连接点(PCC)电压不平衡度所提出的要求^[2]。

采用平衡变压器,是一种抑制由单相负荷引起的负序电流的有效方法,因为该系统具有比非平衡变更强的负序抑制能力。但是平衡变抑制负序的能力受负荷的波动性影响较大,研究结果表明,平衡变两臂的单相负荷越不平衡,其抑制负序的能力越差^[3-4]。另外,由于与多数大功率单相负荷引起的负序问题同时存在的还有谐波和功率因数超标(如电气化铁道、单相电弧炉等),平衡变对此无能为力。

采用晶闸管分组投/切的单相静止无功补偿器能对负序和无功进行综合补偿,但该系统在技术和经济上均难以达到理想状态。更为严重的是该系统所采用的无源器件具有易与电网产生串/并联谐振的风险,故其可靠性在本质上存在缺陷^[5-6]。

基于上述单相补偿系统的缺点,近 20 年来,学者和工程师提出了多种基于 GTO、IGBT 和 IGBT 等全控型大功率电力电子器件的有源补偿系统。其中受到工业用户广为认可的有静止无功发生器(STATCOM)^[7-8]和铁路功率调节器 RPC(Railway static Power Conditioner)^[9]。

STATCOM 主要适用于在单相负荷主变的高压三相电网处进行补偿,考虑到功率器件的耐压水平,STATCOM 与高压电网的耦合部分一般需要大容量工频降压变压器(该变压器的容量有时甚至与主变的容量不相上下)^[10],故系统的损耗和投资成本将大幅增加,同时也将增加整个系统的土建和维护成本。STATCOM 的另外一种发展趋势是采用多电平技术^[11],采用该技术后可以省去降压变压器,但是整个系统的控制将变得十分复杂。

RPC 是一种在电气化铁道单相牵引供电系统中取得成功应用的补偿装置。该系统采用 2 组单相逆变器背靠背连接,通过重新分配牵引网两相的有功潮流,并分别补偿各相的无功和谐波,能成功应对牵引供电系统几乎所有电能质量问题。与 STATCOM 类似,为满足功率器件的电压承载能力,牵引网和 RPC 的耦合部分需采用 2 台大容量工频单相降压变压器^[12-13],故该系统的成本十分可观,目前仅在国内外少数牵引变电所投入了实际应用^[14]。

为弥补上述各补偿系统的缺点,本文提出了一种基于星形三角形接线多功能平衡变压器 Y-DMFBT(Y-D Multi-Function Balance Transformer)^[15-16]的负序和谐波综合治理系统。本系统充分利用了 Y-DMFBT 三相变两相和三相变三相的潜能,在将其作为单相负载供电的主变的同时可将辅助降压变压器与主变融合在一起,即从 Y-DMFBT 二次侧 c、d、e 三抽头引出

收稿日期:2013-10-09;修回日期:2014-07-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077044,51477046);湖南省自然科学基金重点资助项目(12JJ2034);湖南省研究生科研创新项目(CX2014B131)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077044,51477046),the Key Project of Natural Science Foundation of Hunan Province(12JJ2034) and Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate(CX2014B131)

低压电源直接与三相全桥型有源系统 TPARPC (Three Phase Active Regulation Power Converter) 相连。另外,由于 Y-DMFBT 是一种平衡变压器,与非平衡变压器相比,在两相负载不平衡程度相同时,该系统有源部分调节的功率更低,故系统的可靠性和运行效率也更高。省去辅助降压变压器后整个系统的占地面积将大幅减少,故其土建成本和安装难度将变得更低,系统的集成度得到大幅提高。由于该系统充分利用了 Y-DMFBT 和 TPARPC 的潜能,故可以说该系统是一种适用于单相供电系统的具有较高综合性能的电能量综合控制系统。

1 拓扑结构与接线原理

1.1 拓扑结构

本文所提系统的拓扑结构图如图 1 所示。该系统由 Y-DMFBT 作为主变压器为单相负载供电,TPARPC 通过 3 个滤波电抗器与平衡变压器二次侧的三相负载端子(即 c、d、e 端子)相连。

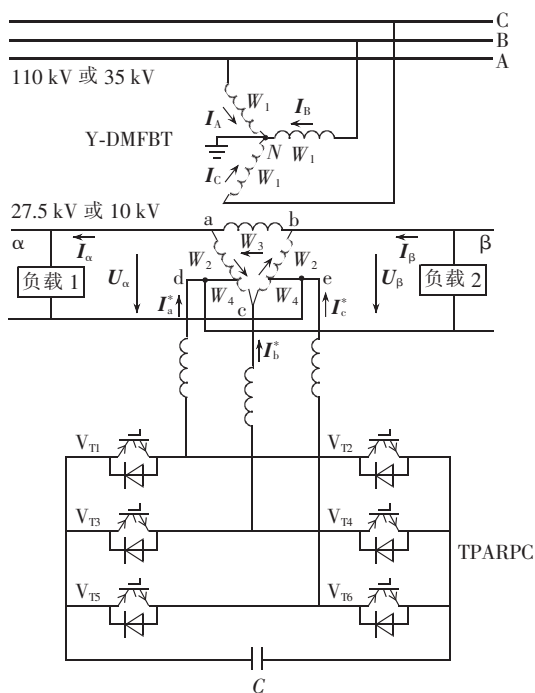


图 1 所提补偿系统的拓扑结构

Fig.1 Topology of proposed compensation system

在设计时,通过改变 Y-DMFBT 二次侧 d、e 抽头处的匝比及阻抗匹配关系,可灵活配置 TPARPC 的供电电压。这样将大幅降低有源系统中功率器件的负担和控制难度,在不需要多电平技术或者外置降压变压器的情况下即可得到较好的补偿效果。同时在有源系统的制造过程中,系统的散热、损耗及维护成本将大幅降低,可靠性也将得到提高。

1.2 主变基本构成原理

Y-DMFBT 既可以给两相负载供电,也可以给三

相负载供电。变压器一次侧三相绕组匝数均为 W_1 ; A、C 相二次侧绕组由 2 个绕组构成,绕组匝数分别为 W_2 和 W_4 ; B 相的二次侧绕组由 1 个绕组构成,匝数为 W_3 。记 $W_1/W_2=K$,各绕组之间的匝数关系为:

$$\begin{cases} W_3 = \frac{\sqrt{3}+1}{2} W_2 \\ W_4 = \frac{\sqrt{3}-1}{2} W_2 \end{cases} \quad (1)$$

各绕组只需满足如式(2)所示的等值阻抗关系式,则两相之间的电气关系互不影响,即两相解耦。

$$\begin{cases} Z_{dc} = \frac{\sqrt{3}-1}{2} Z_{ad}, Z_{ab} = \frac{\sqrt{3}+1}{2} Z_{ad} \\ Z_{ad} = Z_{be}, Z_{dc} = Z_{ec} \end{cases} \quad (2)$$

2 系统的补偿原理

在 Y-DMFBT 中,当单独接两相负载时,一次侧电流和负载端电流满足如式(3)所示关系^[15]:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+3 & \sqrt{3}-3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3}-3 & \sqrt{3}+3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

下面将导出当主变仅带有三相负荷时一、二次侧电流的传递关系。

当 Y-DMFBT 接三相负载时其原理图如图 2 所示。对图 2 中 a、d、c、e、b 运用基尔霍夫电流定律(KCL)可得:

$$\begin{cases} I_{ad} + I_a^* = I_{dc} \\ I_{dc} + I_b^* = I_{ce} \\ I_{ce} + I_c^* = I_{eb} \\ I_{eb} = I_{ba} = I_{ad} \end{cases} \quad (4)$$

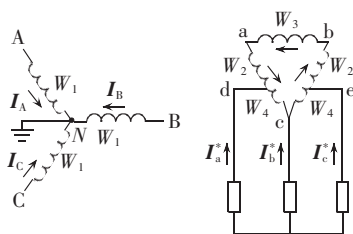


图 2 星形三角形接线多功能平衡变压器接星形三相负载

Fig.2 Y-D multi-function balance transformer with star-connected three-phase load

在二次侧三角形绕组中由基尔霍夫电压定律(KVL)可得:

$$I_{ad} Z_{ad} + I_{dc} Z_{dc} + I_{ce} Z_{ce} + I_{eb} Z_{eb} + I_{ba} Z_{ba} = 0 \quad (5)$$

忽略变压器的励磁电流,由一、二次侧磁势平衡关系可得:

$$\begin{cases} I_A W_1 + I_{ad} W_2 + I_{dc} W_4 = 0 \\ I_B W_1 + I_{ba} W_3 = 0 \\ I_C W_1 + I_{ce} W_4 + I_{eb} W_2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

联立式(1)、(2)、(4)~(6)可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}-1}{6K} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^* \\ \mathbf{I}_b^* \\ \mathbf{I}_c^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

如果 Y-DMFBT 只接两相负载,而且两相负载平衡,则一次侧不会含有负序和零序电流。同理,如果 Y-DMFBT 只接三相负载,且三相负载平衡,在一次侧同样也不产生负序和零序电流。但若 Y-DMFBT 运行在两相负载不对称的场合,一次侧电流中便会出现负序电流。若负载中含有谐波和无功分量,在主变一次侧将会感应出谐波和无功。如果接两相负载的同时,在变压器二次侧的三相负载端接上 TPARPC,由叠加定理可得一、二次侧电流传递关系如式(8)所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+3 & \sqrt{3}-3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3}-3 & \sqrt{3}+3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_\alpha \\ \mathbf{I}_\beta \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}-1}{6K} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^* \\ \mathbf{I}_b^* \\ \mathbf{I}_c^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)的瞬时值表达式为:

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+3 & \sqrt{3}-3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3}-3 & \sqrt{3}+3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}-1}{6K} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^*(t) \\ i_b^*(t) \\ i_c^*(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于含有负序、谐波和无功分量的负载电流 $i_\alpha(t)$ 、 $i_\beta(t)$,可将其分解成基波有功分量和谐波+无功分量 2 个部分,即:

$$\begin{cases} i_\alpha(t) = I_{p\alpha}(t) + I_{l\alpha}(t) \\ i_\beta(t) = I_{p\beta}(t) + I_{l\beta}(t) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $i_{pk}(t)$ 、 $i_{lk}(t)$ 分别为 $k(k=\alpha, \beta)$ 相的基波有功分量和谐波+无功分量。

将式(10)代入式(9)中,可以得到:

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+3 & \sqrt{3}-3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3}-3 & \sqrt{3}+3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{p\alpha}(t) \\ i_{p\beta}(t) \end{bmatrix} + \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+3 & \sqrt{3}-3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3}-3 & \sqrt{3}+3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha}(t) \\ i_{l\beta}(t) \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}-1}{6K} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^*(t) \\ i_b^*(t) \\ i_c^*(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

如果式(11)中存在如下关系:

$$\frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+3 & \sqrt{3}-3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3}-3 & \sqrt{3}+3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{p\alpha}(t) \\ i_{p\beta}(t) \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}-1}{6K} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^*(t) \\ i_b^*(t) \\ i_c^*(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

则主变一次侧三相电流将满足式(13):

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+3 & \sqrt{3}-3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3}-3 & \sqrt{3}+3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{p\alpha}(t) \\ i_{p\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

此时式(13)的一次侧电流中只存在基波正序分量,即达到了完全消除一次侧负序、谐波和无功电流的目的。

由式(12)经简单计算可得:

$$\begin{bmatrix} i_a^*(t) \\ i_b^*(t) \\ i_c^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}+2 & 1 \\ -\sqrt{3}-1 & \sqrt{3}+1 \\ -1 & -\sqrt{3}-2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{p\alpha}(t) \\ i_{p\beta}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} i_{p\alpha}(t) \\ i_{p\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

若能将变流器输出电流控制成式(14)的形式,就能实现主变一次侧负序、谐波和无功的完全补偿。

3 系统的控制策略

3.1 检测部分

本系统的检测方法如图 3 所示,其核心采用基于两相供电电压互差 90° 的瞬时功率检测方法^[17-18]。

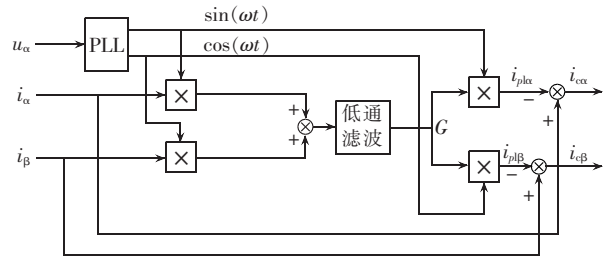


图 3 负序、谐波和无功的检测方法

Fig.3 Principle of negative-sequence, harmonic and reactive power detection

如图 3 所示,将 α 、 β 相负载电流进行傅里叶分解可得到如式(15)所示的关系:

$$\begin{cases} i_\alpha(t) = I_{p\alpha}\sin(\omega t) + I_{l\alpha}\cos(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} i_{\alpha n} \\ i_\beta(t) = I_{p\beta}\cos(\omega t) - I_{l\beta}\sin(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} i_{\beta n} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $I_{p\alpha}$ 、 $I_{p\beta}$ 代表负载电流中的基波有功分量; $I_{l\alpha}$ 、 $I_{l\beta}$ 代表负载电流中的基波无功分量; $\sum_{n=2}^{\infty} i_{\alpha n}$ 、 $\sum_{n=2}^{\infty} i_{\beta n}$ 代表谐波分量。

将式中的 $i_{\alpha}(t)$ 、 $i_{\beta}(t)$ 分别乘以与电压相位的同步信号 $\sin(\omega t)$ 、 $\cos(\omega t)$ ，再将 $i_{\alpha}(t)\sin(\omega t)$ 、 $i_{\beta}(t)\cos(\omega t)$ 相加，经过低通滤波器可以得到 α 、 β 相基波电流有效值的平均值，即：

$$G=\frac{1}{2}\left(I_{p l \alpha}+I_{p l \beta}\right) \quad(16)$$

再将 G 分别与 $\sin(\omega t)$ 、 $\cos(\omega t)$ 相乘，即可得到 α 、 β 相瞬时电流的理想平衡值。该值不再含有谐波和无功分量，并且有效值大小相同。将实际的负载电流瞬时值与理想电流的瞬时值相减，便可以得到所需的补偿电流值 $i_{c \alpha}$ 、 $i_{c \beta}$ ，其表达式如式 (17) 所示：

$$\left\{\begin{aligned} i_{c \alpha}(t) &= i_{\alpha}(t)-\frac{1}{2}\left(I_{p l \alpha}+I_{p l \beta}\right) \sin (\omega t) \\ i_{c \beta}(t) &= i_{\beta}(t)-\frac{1}{2}\left(I_{p l \alpha}+I_{p l \beta}\right) \cos (\omega t) \end{aligned}\right. \quad(17)$$

3.2 控制部分

补偿系统的综合控制策略如图 4 所示。通过检测模块将 α 相电压的相位信息和两相负载电流的瞬时值经由调理电路输入数字控制器，通过控制器计算出两相负载电流中所含有的负序、谐波和无功分量，并由式 (14) 计算出 TPARPC 的指令电流，将指令信

号与输出实际电流 $i_{a f}^{*}$ 、 $i_{b f}^{*}$ 、 $i_{c f}^{*}$ 比较之后，通过 PI 控制器调节，再将其与三角载波进行比较输出功率器件所需要的触发脉冲，从而实现负序、谐波和无功进行综合治理的目的。

4 仿真分析

为验证本文所提出的补偿系统的正确性，参照图 1 在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了系统的仿真模型。整个系统仿真参数如下：网侧电压 35 kV，二次侧电压 10 kV，系统短路容量 360 MV·A，变压器容量 6.3 MV·A，直流侧电容 50 mF，输出电感 1 mH，直流侧电压设定值 5500 V。

4.1 负载不对称工况

为了验证系统在极不对称负荷条件下的补偿效果。本文中选取 β 相空载、 α 相重载作为仿真工况，其中 α 相负载的具体参数如下：有功功率 1.54 MW，无功功率 1.62 Mvar，功率因数 0.69，电流谐波畸变率 (THD) 22.03 %。该工况下的仿真结果如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出，在 0.1 s 投入 TPARPC 后，

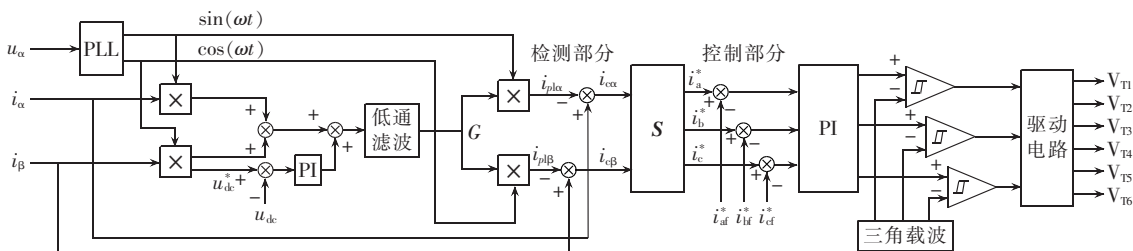


图 4 负序和谐波综合治理系统控制框图

Fig.4 Block diagram of comprehensive negative-sequence and harmonic suppression system

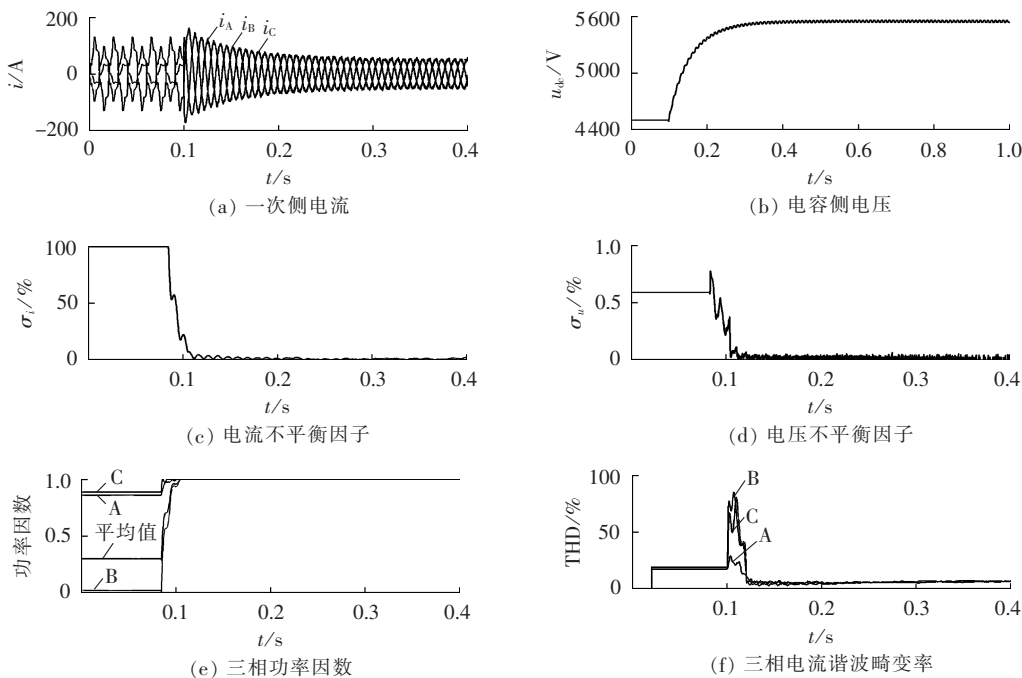


图 5 投入 TPARPC 前后波形及性能对比

Fig.5 Comparison of performance and waveform between with and without TPARPC

原本不对称且畸变严重的一次侧电流波形在系统投入半个周期内就成为了三相对称的正弦波,这说明系统具有较好的暂态性能。从图 5(c)—(f)可以看出在补偿系统投入后,原系统的电压不平衡度、电流不平衡度、功率因数以及电流谐波畸变率均得到了明显的改善(电压、电流不平衡因子 σ_u 、 σ_i 分别从 0.6% 和 100% 降至 0.05% 和 2%;功率因数接近于 1;电流畸变率从 20% 降至 7% 以下)。仔细观察还可得知,这几项电能质量指标均在 1 个周期内达到了稳态,扣除 Simulink 模块自身的运算时间,它们进入稳态的时间应该小于 1 个周期。这说明本系统的确能有效应对单相负荷产生的各种主要电能质量问题。另外,从图 5(b)可以看出当系统投入后,直流侧电压经过 0.3s 的调节时间进入稳态,稳态后直流侧电压的稳定情况良好,最大和最小值在指令量 1% 左右的范围内波动。

4.2 负载变动时的仿真结果

在图 6 所示的负荷变化时序下,系统的仿真结果如图 7 所示。负载参数如下: α 相负载,有功功率 1.54 MW,无功功率 1.62 Mvar,功率因数 0.69,电流谐波畸变率 22.03%; β 相负载,有功功率 2.42 MW,无功功率 1.89 Mvar,功率因数 0.79,电流谐波畸变率 16.52%。

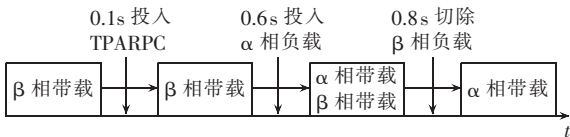


图 6 负载变化情况时序图
Fig.6 Sequence chart during load variation

由图 7(a)可知,当负载从单边带负载变成双边带负载时(0.6s),电流能够很平稳地过渡;当突然撤掉 β 相的负载(0.8s),网侧三相电流仍然能平稳地过渡,在 0.2s 内进行了 2 次负载的突变,但是系统的电流基本平稳,这表明在冲击性负荷条件下本系统仍然有比较好的动态性能。图 7(b)为与图 7(a)相对应的直流电压波形,由图可知,在负荷突变情况下,直流电压的超调量依然不超过 5%,这说明本系统的直流电压具有较好的稳定性。图 7(c)和图 7(d)分别为网侧电流和电压不平衡因子的时序波形,由图可知,其变化波动很小,电流不平衡因子基本上稳定在 2%,电压不平衡因子能小于 0.1%。由图 7(e)可知平均功率因数可以维持在 0.98 的水平。从图 7(f)可以看到,负载每变动一次,一次侧的电流谐波畸变率都会有一定的波动,但是其能够在 1~2 个周期内趋于稳定,因此对电网系统的影响不大。上述仿真结果验证了该系统应对负荷波动时具有较好的补偿效果。

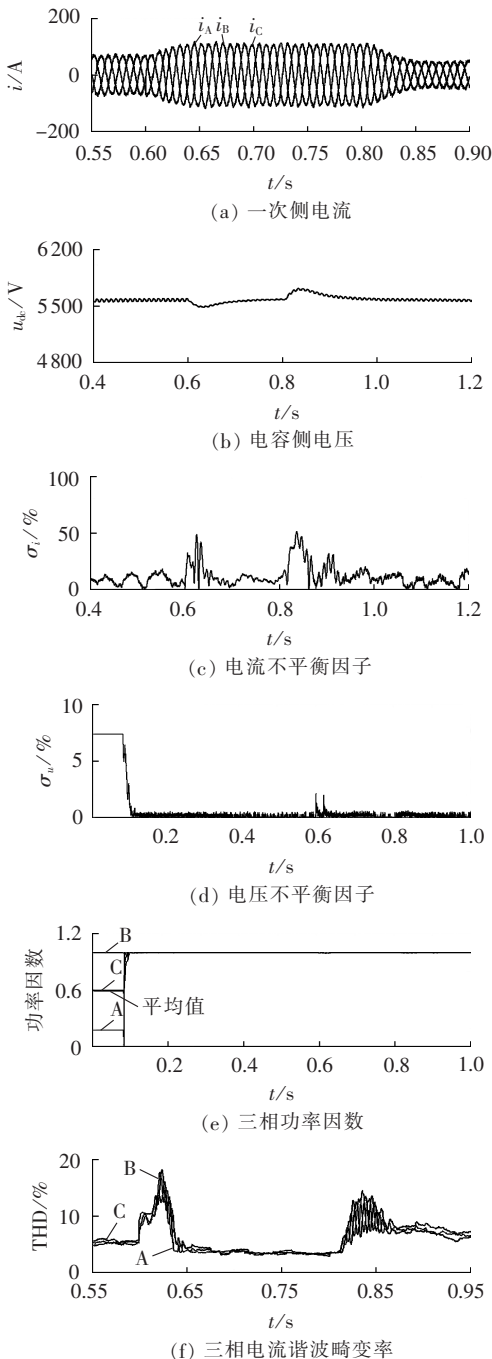


图 7 负载波动时投入 TPARPC 前后性能对比
Fig.7 Comparison of performance during load fluctuation between with and without TPARPC

5 实验分析

为了验证本文提出的构想,在实验室搭建了一个 380 V 电压等级的实物模型。数字控制器采用 TMS320F2812;采样频率为 12.8 kHz;负载用单相不可控整流桥代替;两相功率分别为 $P_\alpha=1\text{ kW}$ 和 $P_\beta=2\text{ kW}$;Y-DMFBT 容量 $5\text{ kV}\cdot\text{A}$;电网电压 380 V;连接电抗 $2.5\text{ mH}/0.1\text{ }\Omega$,50 A;嘉尚 DR50 功率模块每相输出 17.5 A。波形测量仪器为 HIOKI3196 电能质量分析仪。

图8给出了投入TRARPC前后变压器一次侧的电流波形。可知,投入前三相电流谐波畸变率的平均值为13.27%,电流不平衡因子为30.26%;投入后电流波形在半个周期内即趋于稳定,三相电流谐波畸变率平均值为6.19%,电流不平衡因子约为2.43%。这说明本系统的治理效果较为明显。

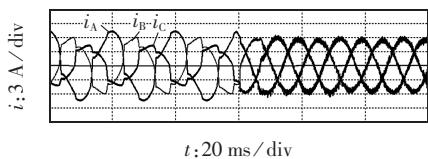


图8 实验波形
Fig.8 Experimental waveforms

6 结论

本文提出了一种将Y-DMFBT和TPARPC融合在一起的单相负荷负序和谐波综合治理系统,分析了该系统的补偿原理,并给出了相应的检测及控制算法,对整个系统进行了仿真分析。仿真结果表明该系统能有效抑制供电系统一次侧的负序和谐波电流,提高其受电端功率因数,并通过实验验证了所提系统的有效性。

本文中所提出的系统充分挖掘了Y-DMFBT和TPARPC的潜能,利用Y-DMFBT二次侧三相系统的对称性,在不需要辅助平衡变压器的条件下实现了Y-DMFBT与主变压器的结合,并且成功地对单相负荷供电系统中的负序、谐波和无功进行了综合治理。相比于传统单相供电场合的电能治理系统,该系统在获得相同补偿效果的前提下,无需辅助降压变压器,同时也可以不采用多电平拓扑结构,因此具有较好的成本优势,运行可靠性也得到了提高。因此,所提系统是一种具有较高综合性能的负序与谐波综合治理系统。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制与无功补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2005:31-49.
- [2] 武中,王志刚,宋述勇,等. 电气化铁道牵引变电所对电力系统影响及治理的仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):77-82.
WU Zhong,WANG Zhigang,SONG Shuyong,et al. Simulation research on the influence and management of the electrified railway traction substation on power system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):77-82.
- [3] 张志文,王耀南,刘福生,等. 多功能平衡变压器的等值电路[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):125-132.
ZHANG Zhiwen,WANG Yaonan,LIU Fusheng,et al. Study on operational mode of multi-function balance traction transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4):125-132.
- [4] 李国建,李光友. 单相电力负荷的平衡对策——对几个变压器专利方案的分析[J]. 变压器,2000,37(12):10-13.
- LI Guojian,LI Guangyou. Countermeasure of non-equilibrium due to single phase load-analysis for some patents of transformer[J]. Transformer,2000,37(12):10-13.
- [5] 孟金岭,肖勇,王文,等. 适用于高速电气化铁路的低成本电能质量综合补偿装置[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(14):73-80.
MENG Jinling,XIAO Yong,WANG Wen,et al. A low cost power quality compensation scheme for high-speed electric railway[J]. Power System Protection and Control,2013,41(14):73-80.
- [6] 张定华,桂卫华,王卫安,等. 大型电弧炉无功补偿与谐波抑制的综合补偿系统[J]. 电网技术,2008,32(12):23-29.
ZHANG Dinghua,GUI Weihua,WANG Weian,et al. Comprehensive compensation system combining reactive power compensation and harmonic suppression for large-scale electric arc-furnace[J]. Power System Technology,2008,32(12):23-29.
- [7] 刘健,尹项根,张哲,等. DT-STATCOM 主电路结构与控制算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):32-37.
LIU Jian,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Main circuit structure and control algorithm of DT-STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):32-37.
- [8] 杨昆,陈磊,陈国柱. DASTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):36-41.
YANG Kun,CHEN Lei,CHEN Guozhu. Individual sequence control of DASTATCOM compensation for unbalanced load[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):36-41.
- [9] HORITA Y,MORISHIMA N,KAI M,et al. Single-phase STATCOM for feeding system of Tokaido Shinkansen[C]//IEEE Conference on Power Electronics Conference. Sapporo,Japan: IEEE,2010:2165-2170.
- [10] 黄伟雄,刘锦宁,王永源,等. 35 kV ±200 Mvar STATCOM 系统总体设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):136-142.
HUANG Weixiong,LIU Jinning,WANG Yongyuan,et al. Overall design of 35 kV ±200 Mvar STATCOM system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):136-142.
- [11] 张振华,江道灼. 基于模块化多电平变流器的 STATCOM 研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):62-66.
ZHANG Zhenhua,JIANG Daozhuo. STATCOM based on modularized multilevel converters[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):62-66.
- [12] MORIMOTO H,ANDO M,MOCHINAGA Y,et al. Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkansen[C]//IEEE Conference on Power Conversion Conference. Osaka,Japan:IEEE,2002:1108-1111.
- [13] 朱红萍,罗隆福. 新型电气化铁道电能质量综合治理装置[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):72-76.
ZHU Hongping,LUO Longfu. Power quality improving device for electric railroads[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):72-76.
- [14] QIU Daqiang,ZHOU Fulin,GAO Shibin,et al. Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(5):1831-1839.
- [15] 张志文,王耀南. 星形-三角形联结三相变两相和三相变三相平衡变压器[J]. 电工技术学报,2006,21(11):82-86.
ZHANG Zhiwen,WANG Yaonan. A novel three-phase to two-

- phase and three-phase balance transformer in Y and Δ connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11):82-86.
- [16] 张志文. 新型平衡变压器和谐波抑制变压器理论与应用研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
- ZHANG Zhiwen. The research on theory and applications of new balance transformer and harmonic suppression transformer [D]. Changsha:Hunan University,2006.
- [17] 夏焰坤,李群湛,赵元哲,等. 基于瞬时无功理论和平衡变压器的牵引变电所电流平衡补偿方法 [J]. 电力自动化设备,2011, 31(9):42-45.
- XIA Yankun,LI Qunzhan,ZHAO Yuanzhe,et al. Compensation based on instantaneous reactive current detection theory and balance transformer for traction substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):42-45.
- [18] 孙卓,姜新建,朱东起. 电气化铁道中谐波、无功、负序电流的实时检测方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(15):53-57.
- SUN Zhuo,JIANG Xinjian,ZHU Dongqi. Detecting methods of reactive power,harmonic and negative-sequence current in

electrified railway systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(15):53-57.

作者简介:



张志文

张志文(1963-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,通讯作者,主要从事交直流电能变换系统理论与新技术、现代电气装备自动化与新技术、电力系统谐波抑制、新型电力电子器件及应用等研究(E-mail:hdzzw@126.com);

陈明飞(1989-),男,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事电力系统电能质量分析与控制、电气化铁道负序和谐波综合治理等方面的工作(E-mail:goodmingfei@163.com);

胡斯佳(1987-),男,湖南湘潭人,博士研究生,主要从事电力系统电能质量分析与控制、电气化铁道负序和谐波综合治理、大功率多电平逆变器以及柔性交流输电系统等工作(E-mail:huda_hsj@163.com)。

Comprehensive negative-sequence and harmonic suppression system based on Y-D multi-function balance transformer

ZHANG Zhiwen, CHEN Mingfei, HU Sijia, LI Yong, WANG Dan, JIANG Peng

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the negative-sequence and harmonic problems commonly existed in different single-phase power supply systems, a comprehensive suppression system is proposed, which consists of a Y-D multi-function balance transformer (three-phase to two-phase and three-phase to three-phase), a three-phase full-bridge active power regulator, etc. It makes full use of the balance transformer to decrease the capacity of the active power regulator, flexibly change the voltage level, lower the device cost and achieve the comprehensive suppression of negative-sequence, harmonic and reactive power. Its compensation principle and detection control method are described. The system is simulated and tested under the operating conditions of load imbalance and load fluctuation and the results prove the correctness of its compensation principle and detection control method.

Key words: negative sequence current; harmonic current; Y-D multi-function balance transformer; three-phase full-bridge active power regulator; harmonic analysis; electric transformers