

基于“I”型三电平中点钳位型逆变器的 SPC 不平衡补偿分析

王振浩¹, 刘大伟¹, 任国东², 成 龙¹, 李国庆¹

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网黑河供电公司, 黑龙江 黑河 161400)

摘要:为治理低压配电网负荷的三相不平衡问题,研究了一种电能质量补偿装置,它由三相三电平中点钳位型逆变器组成。设计了具有复合结构的复数滤波器,其能够快速准确地提取电网电流的正负序分量。在分析逆变器原理和数学模型的基础上,推导出内嵌重复控制器的无差拍控制公式,以弥补输出电流和指令电流的延时,优化开关管开关机时的工作逻辑,保证“I”型桥臂内、外管承受电压一致。基于 MATLAB/Simulink 仿真环境和物理实验平台对所提的结构和控制策略进行仿真和实验验证,仿真和实验结果表明,该装置能有效地补偿三相电流不平衡,提高电能质量。

关键词:三相不平衡;配电网;中点钳位型逆变器;复数滤波器;无差拍控制;电能质量

中图分类号:TM 464

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.014

0 引言

我国的低压配电网结构复杂,用户大多为居民或农网用电,负荷性质多样,波动大,三相负荷不平衡问题是造成低压配电网损耗较大的主要因素之一。低压配电网为三相四线制系统,三相负荷不对称一般不会导致三相电压偏差,但会引发严重的三相电流不对称现象,并产生较大的负序和零序电流。其基波负序电流会使发电机、输电线路和变压器产生较严重的附加损耗^[1-2],导致中性线上流过大量零序电流,增加中性线损耗和造成中性点偏移及相与相间电流相位不对称,使得配电变压器出力降低,危及其安全与使用寿命,严重影响供电质量及低压配电网的经济运行,因此需要进行补偿治理^[3-4]。目前,治理三相不平衡问题的手段相对欠缺,且投入大,效率低,从根本上解决配电网末端不平衡问题难度很大。鉴于新型三电平拓扑结构逆变器具有输出谐波小、可靠性高、体积小、制造成本低的特点^[5],本文以此为基础设计了基于三电平中点钳位型逆变器(NPC)的低压配电网智能电能质量补偿装置(SPC),实现了低压配电网精确的有功、无功功率快速转移和补偿。

为实现对三相不平衡电流的精确调补,首先要实现对不平衡电流中所包含的负序、零序电流分量的精确提取。文献[6]在瞬时无功功率理论的基础

上,提出一种以电压为参考求取电流不平衡分量的检测方法。该方法在电压出现不对称情况时会产生一定的误差,导致检测结果准确度较差。文献[7]采用自适应检测方法,通过自适应滤波器实现对电流中不平衡分量的跟踪,能够避免电网电压波动对检测精度的影响,但该方法不能将基波负序电流与谐波电流区分开,无法在三相不平衡时精确补偿系统中的负序电流。文献[8]提出一种静止坐标系下同时检测正序、负序及谐波分量的滤波器结构,但该结构采用一阶滤波器,受正序电流的干扰很大。同时,精确跟踪参考指令电流也是决定三电平 SPC 补偿效果的关键。传统电流内环控制方法包括比例-积分(PI)控制、比例-谐振(PR)控制等,但当系统三相不平衡时,上述传统内环控制方法很难实现对参考电流的无差跟踪^[9-10]。本文采用无差拍控制,其是一种数字控制,具有数字推导严密、跟踪精度高、动态响应速度快等优点,近年来得到了广泛的研究与应用^[11-12]。

本文分析了“I”型三相电压型逆变器的基本原理,以低压配电网三相不平衡时能够快速精确提取电流基波的正负零序分量为基础,引入无差拍控制,设计了电压外环采用传统 PI 控制,电流内环采用无差拍控制的双闭环控制结构,并采用二阶滤波器^[13-14]及空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法消除交流电流的稳态跟踪误差,以保证较高的 SPC 稳态输出性能。最后通过 MATLAB/Simulink 仿真及基于 TMS320 DSP 样机的物理实验,验证了调补的正确性和可行性。

1 SPC 基本原理

1.1 三电平 SPC 系统电路模型

三相四线制“I”型三电平 SPC 主电路结构如图 1 所示。图中, u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为三相网侧电压; i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 为电网注入的三相电流; i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 和 i_{cn} 分别为

收稿日期:2018-07-19;修回日期:2019-03-05

基金项目:吉林省科技厅项目(20160307014GX);黑龙江省电力有限公司科技项目(配电台区电能质量综合优化关键技术研究与应用)

Project supported by the Science and Technology Project of Department of Jilin Province (20160307014GX) and the Science and Technology Project of State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd. (Research and Application of Key Technologies for Power Quality Comprehensive Optimization in Power Distribution Area)

SPC 输出的三相电流和中线补偿电流; i_{la} 、 i_{lb} 和 i_{lc} 为三相负载电流; i_{sn} 为网侧中线电流; i_{ln} 为负载中线电流; L 为 SPC 滤波电感; R 、 R_n 为交流电抗的等效电阻; C_1 、 C_2 为直流侧滤波电容; u_{dc1} 和 u_{dc2} 分别为直流侧上、下桥臂的电容电压, 正常工作情况下要求 $u_{dc1} = u_{dc2} = u_{dc}$ 。

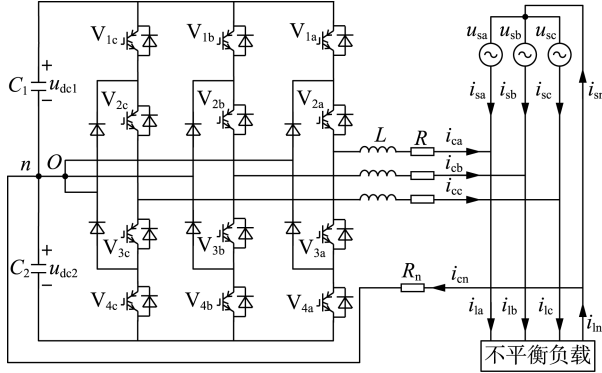


图1 三相四线制三电平 SPC 主电路

Fig.1 Main circuit of three-phase four-wire three-level SPC

SPC 的基本工作原理如下: 首先将电流互感器采集的负载电流通过正负零序电流检测环节得到应补偿的正序无功电流和负序、零序电流期望值, 然后控制三电平逆变器各桥臂开关器件开断, 使 SPC 注入系统的电流为应补偿的正序无功电流和负序、零序电流期望值的相反数, 从而保证网侧三相电流平衡。

1.2 SPC 系统数学模型分析

三电平 SPC 的等效电路图如图 2 所示。

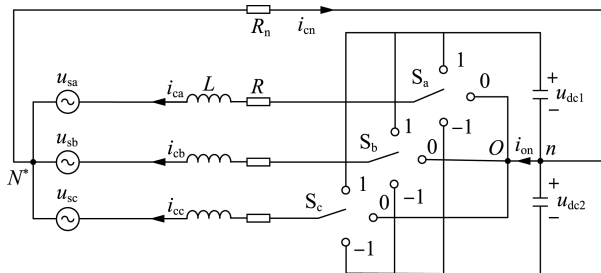


图2 三电平 SPC 等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of three-level SPC

由图 2 可以定义开关函数为:

$$V_y = \begin{cases} 1 & V_{1y} \text{ 和 } V_{2y} \text{ 导通} \\ 0 & V_{2y} \text{ 和 } V_{3y} \text{ 导通} \\ -1 & V_{3y} \text{ 和 } V_{4y} \text{ 导通} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $y=a, b, c$ 。

若暂不考虑直流侧上、下桥臂电容电压不平衡问题, 则 SPC 各桥臂对电网的中性点电压可以描述为:

$$u_{yn} = V_y u_{dc} \quad (2)$$

以流过滤波电感的电流 i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 为状态变量得到回路方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + R_n \begin{bmatrix} i_{cn} \\ i_{cn} \\ i_{cn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)由 abc 坐标系变换到 $\alpha\beta 0$ 坐标系下:

$$\begin{cases} u_\alpha = u_{s\alpha} + L \frac{di_\alpha}{dt} + Ri_\alpha \\ u_\beta = u_{s\beta} + L \frac{di_\beta}{dt} + Ri_\beta \\ u_0 = u_{s0} + L \frac{di_0}{dt} + (R + 3R_n) i_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{s0} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}$$

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

由式(4)可知, 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系下 SPC 的三桥臂不存在耦合关系, 可进行单独控制。以 α 轴为例, 得到 SPC 传递函数为:

$$G_0(s) = \frac{i_\alpha(s)}{u_\alpha(s) - u_{s\alpha}(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (5)$$

2 无差拍控制

三电平 SPC 的控制系统可分为电压外环和电流内环两部分。电压外环维持变流器直流侧电容的电压恒定, 采用 PI 控制进行稳压调节^[15]; 电流内环可分为求取补偿电流参考值的上层算法模块和跟踪参考电流的控制模块两部分。为减小锁相环误差和简化控制器结构, 本文针对上层算法模块, 在两相静止坐标系下设计了二阶复数滤波器以实现电网电流正、负序分量的提取, 并提高对正、负序基波分量的滤波效果; 在控制模块中采用内置重复控制器的无差拍控制方法生成指令电压, 并在 SVPWM 中采用调节正负小矢量作用时间的方法控制中点电位波动^[16]。

2.1 正负序滤波器的基本原理

二阶滤波器的传递函数为:

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + \zeta s + \omega_c^2} \quad (6)$$

其中, ω_c 为带通滤波器截止频率; ζ 为阻尼系数。

将式(6)中的 s 用 $s - j\omega_0$ 替代可得:

$$i_{\alpha\beta}(s) \frac{\omega_c^2}{(s-j\omega_0)^2 + \zeta(s-j\omega_0) + \omega_c^2} = i_{\alpha\beta}^+(s) \quad (7)$$

则二阶正序复数滤波器的传递函数为:

$$G^+(s) = \frac{\omega_c^2}{(s-j\omega_0)^2 + \zeta(s-j\omega_0) + \omega_c^2} \quad (8)$$

其中, ω_0 为基波角频率。

由式(8)可知,在正序基波频率 ω_0 处,滤波器增益为 1,说明正序基波分量可被完全提取。

对式(7)所示的复数形式进行实部和虚部展开,得到 $\alpha\beta$ 坐标系下二阶正序复数滤波器结构框图如附录 A 中图 A1 所示。

附录 A 中图 A2 为正序滤波器 $G^+(s)$ 的波特图。由图可知,在基波频率 50 Hz 处,二阶正序复数滤波器的幅频特性为 1,相频特性为 0,因此可实现基波分量无衰减通过。

由附录 A 中图 A1 可知,正序基波滤波器中存在一组原始输入信号剥离正序成分后的残余信号,即 $i_\alpha - i_\alpha^+$ 和 $i_\beta - i_\beta^+$,因此可通过叠加一个简单的一阶低通负序滤波器构建一组复合式滤波器,以从不平衡电压中分离出正、负序基波成分,并提取负序电流。一阶负序滤波器的传递函数为:

$$G^-(s) = \frac{\omega_c}{s + j\omega_0 + \omega_c} \quad (9)$$

二阶正序和一阶负序级联式复合滤波器等效框图如图 3 所示。若输入信号中除了基波成分外还有其他谐波成分,还可同时分离出总的谐波分量 i_{ah} 和 i_{bh} 。

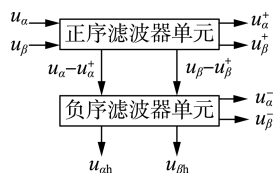


图 3 正负序滤波器单元级联结构

Fig.3 Cascaded structure of positive- and negative-sequence filter element

附录 A 中图 A3 为负序滤波器 $G^-(s)$ 的波特图。由附录 A 中图 A2、A3 可知,与通过锁相环提取基波正、负序分量不同,复合复数滤波器无需多次坐标变换,在 $f = \pm 50$ Hz 时仅经一次 Clarke 变换即可快速提取电流正、负序分量,因此复数滤波器采集电流的实时性和精确性均优于锁相环方式,并可避免锁相误差。

2.2 无差拍控制原理

无差拍控制实质上是一种针对离散采样系统而提出的预测控制算法,其控制精度主要由 $k+1$ 时刻预测补偿电流值的精度决定。在通过正、负序电流检测方法已得到 SPC 输出电流参考值的基础上,应用无差拍控制算法便可得到 SPC 中各个功率管的

控制规律,进而实现三相不平衡补偿。其控制系统框图如图 4 所示。

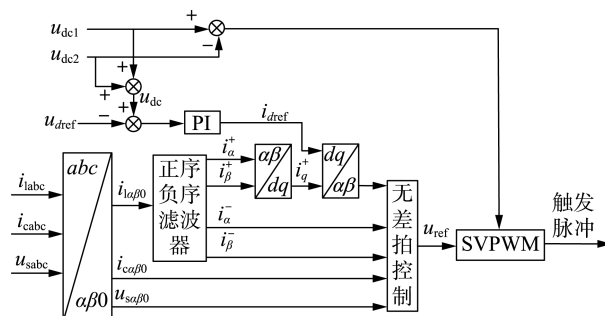


图 4 三电平 SPC 控制系统框图

Fig.4 Block diagram of three-level SPC control system

图 4 中,无差拍控制利用下一时刻指令电流的预测值、当前时刻各种开关状态下变流器的电流输出值和直流侧电压值,计算当前时刻指令电压,选择某种开关模式,实现电流误差为 0 的目的。对式(4)进行离散化可得:

$$\begin{cases} u_\alpha = \frac{L}{T_s} (i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k)) + Ri_\alpha(k) + u_{s\alpha} \\ u_\beta = \frac{L}{T_s} (i_\beta(k+1) - i_\beta(k)) + Ri_\beta(k) + u_{s\beta} \\ u_0 = \frac{L}{T_s} (i_0(k+1) - i_0(k)) + Ri_0(k) + 3R_n i_0(k) + u_{s0} \end{cases} \quad (10)$$

其中, T_s 为开关周期; $i_m(k)$ ($m = \alpha, \beta, 0$) 为并联型 SPC 实际输出电流; $i_m(k+1)$ ($m = \alpha, \beta, 0$) 为下一采样时刻补偿电流。令下一采样时刻补偿电流 $i_m(k+1) = i_m^*(k)$, 则式(10)可表示为:

$$\begin{cases} u_\alpha = \frac{L}{T_s} (i_\alpha^*(k) - i_\alpha(k)) + Ri_\alpha(k) + u_{s\alpha} \\ u_\beta = \frac{L}{T_s} (i_\beta^*(k) - i_\beta(k)) + Ri_\beta(k) + u_{s\beta} \\ u_0 = \frac{L}{T_s} (i_0^*(k) - i_0(k)) + Ri_0(k) + 3R_n i_0(k) + u_{s0} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)可知,这是差一拍控制, α 轴无差拍控制框图如图 5 所示。图中 $G_0(z)$ 为被控对象的传递函数(为了便于分析,假定 SVPWM 环节的增益 $G_{PWM}(z) = 1$, 则其延时可忽略不计)^[17]。

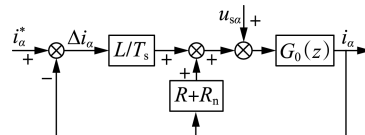


图 5 α 轴无差拍控制框图

Fig.5 Block diagram α -axis deadbeat control

为了进一步提高补偿性能,本文在无差拍控制的电流环嵌入重复控制器以补偿无差拍控制自身带

有的一拍延时^[18]。其在 α 轴下的控制原理框图如图6所示。

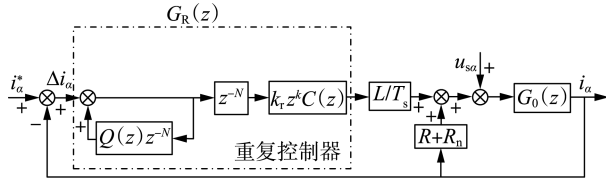


图6 嵌入重复控制器的无差拍控制框图

Fig.6 Deadbeat control block diagram when embedding repetitive controller

SPC控制系统电流环重复控制脉冲传递函数为:

$$G_R(z) = \frac{k_r z^{k-N}}{1-Q(z)z^{-N}} C(z) \quad (12)$$

其中, $N=f_c/f_0$, 为装置在一个基波周期内的采样点个数, f_c 为采样频率, 取 10 kHz, f_0 为基波频率, 取 50 Hz, 故得到 $N=200$; k_r 为重复控制器比例系数; $Q(z)$ 的设置需综合考虑稳定性和跟踪精度的要求, 可按 4% 误差选取, 即取 $Q(z)=0.96$; z^k 为相位补偿环节, 主要用于补偿 $C(z)$ 在低频段引起的相位滞后。装置对三相四线制系统不平衡度进行补偿时, 补偿的是基波的负序分量。

图1中的主电路参数取 $L=3\text{ mH}$ 、 $R=0.2\ \Omega$, 则:

$$G_0(s) = \frac{1}{Ls+R} = \frac{1}{0.003s+0.2} \quad (13)$$

采样周期 $T_s=10^{-4}\text{ s}$, 经零阶加持器的 z 变换离散化得到:

$$G_0(z) = \frac{0.033\ 22}{z-0.993\ 4} \quad (14)$$

结合以上分析, 并对校正环节的传递函数进行离散化得到:

$$C(z) = \frac{45(z-0.994\ 2)}{z-0.740\ 8} \quad (15)$$

由于 $C(z)$ 会带来 1 个采样周期的延迟, 加上无差拍控制本身延迟的 1 个采样周期, 因此超前补偿环节 k 可取 2。 k_r 的值应在权衡系统整体稳定性和动态响应速度间折中选取, 结合文献[19], 本文取 $k_r=0.9$ 。则电流内环的闭环传递函数 $\phi(z)$ 为:

$$\phi(z) = 1 - \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-N}Q(z)(1-k_rLz^kC(z)G_0(z)/T_s)} \quad (16)$$

电流内环的闭环传递函数的波特图如图7所示。可见, 补偿后基波频率初相位超前 $0.002\ 95^\circ$, 系统可以稳定运行, 说明内置重复控制器的无差拍控制效果明显, 不平衡补偿精确度大幅提高。

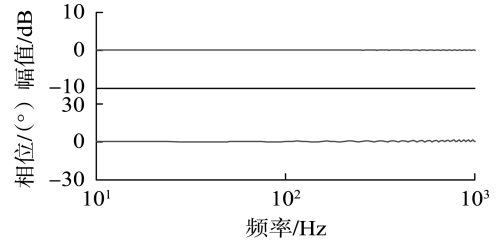


图7 电流内环传递函数的波特图

Fig.7 Bode diagram of transfer function for current inner loop

2.3 中点电压平衡控制

SPC 主要由三电平 NPC 结构的逆变器构成, 用来补偿三相不平衡, 因此接入系统的负载具有不对称性。因为负载的不对称以及 SPC 自身工作时需要消耗能量, 所以需要采取控制策略, 维持中点电压平衡, 提高 SPC 的补偿效果。

根据图2, 中点电流 i_{on} 能够影响中点电位的波动, 而不同的开关状态对中点电流 i_{on} 的影响不同, 中点电位的波动取决于中点是否有电流流入或流出。SVPWM 一共有 $3^3=27$ 种开关状态, 包括零矢量 3 种, 大矢量 6 种, 中矢量 6 种, 正负小矢量共 12 种。经过分析发现, 中矢量和中小矢量的开关状态对中点电流 i_{on} 有影响, 其中小矢量的冗余开关状态对中点电流 i_{on} 的影响是恰好相反的, 因此可以通过合理利用存在的冗余状态来实现直流侧的均压控制^[20]。

由文献[20]可知, 100 与 0-1-1、011 与 -100、010 与 -10-1、101 与 0-10、001 与 -1-10、110 与 00-1 等互为冗余状态。假设目前开关可以选取的状态如图8(a)和(b)所示, 为 110 或 00-1 时, 两者对直流侧电压的影响相反, 若此时 $u_{dc1} < u_{dc2}$, 需减小 u_{dc2} 从而增大 u_{dc1} 。若 c 相 SPC 输出电流 $i_{cc} > 0$, 选择开关状态 110 会减少 u_{dc2} , 此时电容 C_2 对外放电, 由于总的直流侧电压保持恒定, 因此 u_{dc1} 增加; 若 c 相 SPC 输出电流 $i_{cc} < 0$, 选择开关状态 00-1 会减少 u_{dc2} , 使 u_{dc1} 增加。其他的冗余开关状态的选择可以用相同的方法分析。

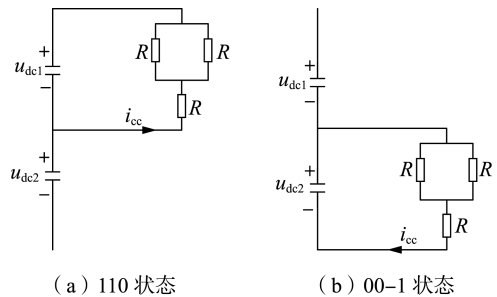


图8 选取的开关状态对应的拓扑

Fig.8 Topology of selected switch state

在调制策略中加入均压控制后, 仿真及实验平台中上、下电容的电压如附录 A 中图 A4 所示。可

见这种均压控制是有效的。

3 启停时序优化设计

由图 1 可知,“I”型三电平逆变器每一相桥臂上都包含 4 个开关管、4 个反向恢复二极管和 2 个钳位二极管,其中 V1 与 V3 互补,V2 与 V4 互补,其工作逻辑如图 9 所示。

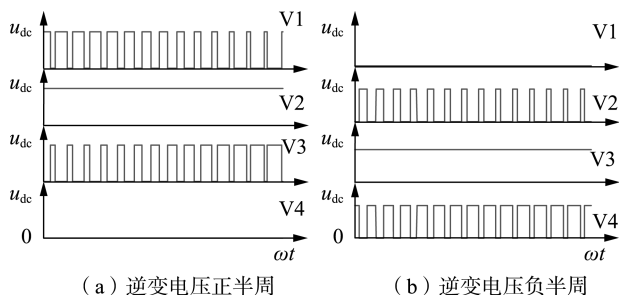


图 9 传统的开关管工作逻辑

Fig.9 Traditional switching operation logic

为保证 SPC 启停时同一桥臂上内、外管承受相同电压,在时序控制中加入启停逻辑控制。启动时内管先于外管导通,关机时外管先于内管关断,即:①逆变电压正半周开机时,V2 超前 V1 导通,V4 关断;②逆变电压正半周关机时,V1 超前 V2 关断,V4 关断;③逆变电压负半周开机时,V3 超前 V4 导通,V1 关断;④逆变电压负半周关机时,V4 超前 V3 关断,V1 关断^[21]。优化后的“I”型三电平逆变器各桥臂内、外管开断时电压一致,最大为 u_{dc} ,其工作逻辑如图 10 所示。

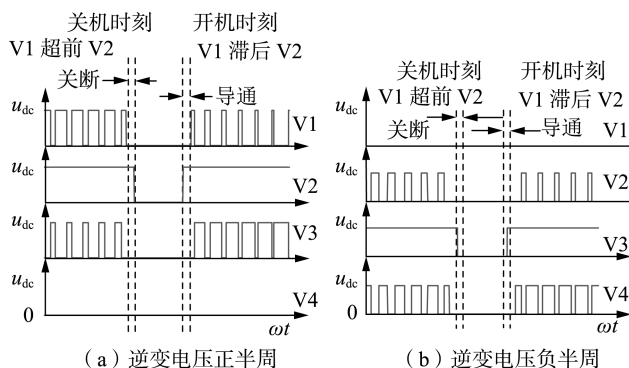


图 10 优化后的开关管工作逻辑

Fig.10 Optimized switching operation logic

4 仿真与实验分析

4.1 仿真分析

为了验证在三相四线制低压配电系统中发生不平衡时,本文采用的三电平拓扑结构整流器补偿三相不平衡控制策略的正确性,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建系统的仿真模型。系统的相关参数见附录 B 中表 B1。

$t=0$ 时,三相投入不平衡负载,网侧 a、b、c 三相

电流有效值分别为 25.2、26.8、20.4 A,三相不平衡度为 15.47%,中线电流为 26.8 A。其中 c 相的功率因数只有 0.54。 $t=0.2$ s 时,SPC 投入运行,网侧三相电流达到平衡,c 相的功率因数上升到 0.98,三相系统各相的功率因数也提高到接近于 1,网侧 a、b、c 三相电流有效值分别为 19、19.7、18.8 A,三相不平衡度为 2.78%,中线电流为 3.9 A。SPC 的 a、b、c 三相输出电流有效值分别为 17、7.6、19 A,中线电流为 25.4 A。 $t=0.4$ s 时,负荷突然变化,考虑极端情况,c 相不带负载,变化后的负载 a、b、c 三相电流有效值分别为 27.6、27.2、0.8 A,三相不平衡度为 95.68%,中线电流为 26.1 A。

网侧三相电流和 SPC 输出电流波形分别如附录 B 图 B1(a)和(b)所示。由附录 B 中图 B1(a)可以看出,SPC 投入后能够有效补偿三相不平衡,并且当负载发生突变时,经 150 ms 左右可以补偿到平衡状态,此时网侧 a、b、c 三相电流有效值分别为 19.74、18.21、18.43 A,三相不平衡度为 5.04%,中线电流为 2.85 A。从附录 B 中图 B1(b)可以看出,SPC 具有很好的动态性能,可作为一种实用的补偿装置。

系统的有功功率和无功功率如附录 B 中图 B2 所示。由图中的无功功率波形可知,SPC 能够补偿系统的无功功率。

附录 B 中图 B3 为三相系统的正负零序电流分量。从图中可以看到,在 SPC 投入运行后,系统中的负序零序分量基本降为 0;经过 0.15 s 后,系统的正序分量稳定。

4.2 实验分析

为了进一步验证所研究的设备结构及控制方法的正确性,采用 TMS32F28335 DSP 为系统的控制核心,研制了一台三电平电能质量补偿装置,搭建了三相不平衡负载硬件平台,三相不平衡负载各相电流参数如下:网侧 a、b、c 三相电流有效值分别为 25.2、26.8、20.4 A,三相不平衡度为 15.47%,中线电流为 26.8 A。附录 B 中图 B4 给出了实验平台实物图。采用 Tektronix MSO5000 数字示波器测量实验波形,采用 Fluke 435 II 电能质量分析仪测量三相电流有效值以及计算电流不平衡度和功率因数。

实验结果如附录 B 中图 B5 所示。从附录 B 中图 B5(a)可以看出,在实验样机投入运行前,系统的三相电流明显不平衡。从附录 B 中图 B5(b)可以看出,实验样机投入后,系统三相电流达到平衡状态,三相不平衡度下降到 5.2%,满足要求。

在补偿平衡后的 A 时刻,将三相负载电流参数变换到网侧 a、b、c 三相电流有效值分别为 19.0、19.6、17.8 A,三相不平衡度为 5.31%,中线电流为 3.69 A 进行动态实验。由附录 B 中图 B4(c)—B4(e)可以看出,当负载突然变化时,SPC 经过 300 ms

左右的时间便可以达到新的平衡稳定,此时网侧a、b、c三相电流有效值分别为19.1、19、17.6 A,三相不平衡度为5.21%,中线电流为4.17 A。

5 结论

为解决低压配电网三相不平衡问题,本文基于NPC逆变器,设计了能够补偿三相不平衡电流的SPC。针对SPC需要在三相不平衡时快速准确地检测负序、零序电流分量,设计了一种具有复合结构的滤波器,由传递函数的波特图可以看出,该复合滤波器是有效的,可以很好地避免使用锁相环带来的误差。在电流内环采用了基于重复控制器的无差拍控制策略,降低了补偿电流与指令电流的误差,提高了响应速度与精度。在MATLAB仿真的基础上,搭建了基于TMS32F28335 DSP控制核心的SPC实验样机,通过实验证明了SPC能够有效地解决三相四线制低压配电网系统三相电流不平衡问题,控制效果与预期吻合,是一种实用的治理三相电流不平衡的装置。但当采用该实验平台在补偿三相不平衡时,输出电流谐波含量较多,如何滤除产生的谐波还需进一步的研究与改进,从而优化SPC的补偿性能。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 程汉湘. 无功补偿理论及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2016:2-3.
- [2] 袁旭峰,高璐,文劲宇,等. VSC-HVDC 三相不平衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):1-5.
YUAN Xufeng, GAO Lu, WEN Jinyu, et al. Unbalanced three-phase control strategy of VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 1-5.
- [3] 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.
- [4] 邱大强,李群湛,周福林,等. 基于背靠背 SVG 的电气化铁路电能质量综合治理[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):36-44.
QIU Daqiang, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, et al. Comprehensive power quality control of electric railway based on back-to-back SVG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 36-44.
- [5] 张靖,程时杰,文劲宇,等. 通过选择 SVC 安装地点提高静态电压稳定性的新方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):7-11.
ZHANG Jing, CHENG Shijie, WEN Jinyu, et al. A novel steady-state voltage stability enhancement method based on SVC allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 7-11.
- [6] BHIMS S, SHAILENDRA S. Design and implementation of four-leg voltage-source-converter-based VFC for autonomous wind energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 694-703.
- [7] 引许胜,赵剑锋,唐国庆. 一种 DSTATCOM 补偿指令电流的实时检测方法[J]. 电力电子技术,2009,43(11):11-13.
- YIN Xusheng, ZHAO Jianfeng, TANG Guoqing. A real time detection method for DSTATCOM compensation instruction current[J]. Power Electronic Technology, 2009, 43(11): 11-13.
- [8] 辛业春,李国庆,王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(14):72-78.
XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase load imbalance by sequential component method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.
- [9] 张兴,汪杨俊,余畅舟,等. LCL 并网逆变器改进型重复控制策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):101-107.
ZHANG Xing, WANG Yangjun, YU Changzhou, et al. An improved repetitive control strategy for grid-connected inverters with LCL filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 101-107.
- [10] 郭小强,郭伟扬,漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):22-29.
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-29.
- [11] NISHIDA K, RUKONUZZMAN M, NAKAOKA M. Advanced current control implementation with robust deadbeat algorithm for shunt single-phase voltage-source type active power filter[J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 2004, 151(3): 283-288.
- [12] 周娟,秦静,王子绩,等. 内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报,2013,28(2):233-238.
ZHOU Juan, QIN Jing, WANG Ziji, et al. Application of deadbeat control with built-in repetitive controller in active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 233-238.
- [13] 万健如,裴玮,张国香. 统一电能质量调节器同步无差拍控制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):63-67.
WAN Jianru, PEI Wei, ZHANG Guoxiang. Research on synchronization deadbeat control algorithm for unified power quality conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 63-67.
- [14] 王振浩,张震,李国庆. 基于补偿原理的 MMC-HVDC 系统不对称故障控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,41(17):94-100.
WANG Zhenhao, ZHANG Zhen, LI Guoqing. Asymmetric fault control strategy for MMC-HVDC system based on compensation principle[J]. Automations of Electric Power Systems, 2013, 41(17): 94-100.
- [15] 何英杰,邹云屏,林磊,等. 三电平有源滤波器直流侧电压控制方法[J]. 高电压技术,2006,32(6):79-83.
HE Yingjie, ZOU Yunping, LIN Lei, et al. Research on the control algorithm of DC voltage for an active filter with three-level NPC inverter[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 79-83.
- [16] 姜卫东,王群京,史晓峰,等. 中点钳位型三电平逆变器在空间矢量调制时中点电位的低频振荡[J]. 中国电机工程学报,2009,29(3):49-55.
JIANG Weidong, WANG Qunjing, SHI Xiaofeng, et al. Low frequency oscillation of neutral point voltage of neutral point-clamped three-level VSI under SVPWM control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 49-55.
- [17] 史丽萍,蔡儒军,陈丽兵,等. 三相三线制有源滤波器的改进无差拍控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(14):32-37.
SHI Liping, CAI Rujun, CHEN Libing, et al. Improved deadbeat control of three phase three wire active power filter[J]. Power System

- Protection and Control, 2014, 42(14): 32-37.
- [18] 黄海宏, 王钰, 许若冰, 等. 双环重复控制三相四线制有源电力滤波器[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 40-45.
HUANG Haihong, WANG Yu, XU Ruobing, et al. Dual-loop repetitive control three-phase four-wire active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 40-45.
- [19] 乔鸣忠, 夏益辉, 梁京辉, 等. 基于重复-PI的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 54-59.
QIAO Mingzhong, XIA Yihui, LIANG Jinghui, et al. Research on PI control based compound controller applying to shunt active filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 54-59.
- [20] 鄢志平, 何英杰, 李毅, 等. 三电平四桥臂 SVG 三电流滞环控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5575-5583.
YAN Zhiping, HE Yingjie, LI Yi, et al. Study on three-level four-leg SVG three-current hysteresis control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5575-5583.
- [21] 汪波, 胡安, 唐勇. IGBT 电压击穿特性分析[J]. 电工技术学报, 2012, 26(8): 145-150.

WANG Bo, HU An, TANG Yong. Analysis of voltage breakdown characteristics of IGBT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 26(8): 145-150.

作者简介:



王振浩

王振浩(1964—),男,山东潍坊人,教授,主要研究方向为输变电设备运行状态监测与诊断、配电系统节能及运行优化、新能源并网控制等(E-mail: zhenhaowang@126.com);

刘大伟(1993—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究方向为配电系统电能

质量综合优化治理(E-mail: 1152518390@qq.com);

成 龙(1988—),男,吉林吉林人,助理实验师,硕士,通信作者,主要研究方向为交直流配电系统建模及运行控制、电能质量综合优化(E-mail: chl@neepu.edu.cn)。

Analysis of SPC imbalance compensation based on “I” type three-level neutral-point clamped inverter

WANG Zhenhao¹, LIU Dawei¹, REN Guodong², CHENG Long¹, LI Guoqing¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Heihe Electric Power Company, Heihe 161400, China)

Abstract: Three-phase electricity demands are generally unbalanced in low-voltage distribution networks. To deal with this issue, a power quality compensation device composed of a three-phase three-level neutral-point clamped inverter is studied. A complex filter with composite structure is designed, which can extract the positive- and negative-sequence components of the grid current quickly and accurately. Based on the analysis of the principle and mathematical model of the inverter, the deadbeat control formula of the repetitive controller embedded is deduced to compensate for the delay of the output current and the instruction current. At the same time, the working logic of the switch tube during startup and shutdown is optimized. Consequently, that inner and outer tubes of the “I” type bridge arm bear the same voltage can be ensured. Finally, the proposed structure and control strategy are simulated and verified on MATLAB/Simulink simulation environment and the physical experiment platform. The simulative and experimental results indicate that the device can effectively compensate the three-phase current unbalance and improve the power quality.

Key words: three-phase unbalance; distribution network; neutral-point clamped inverter; plural filter; deadbeat control; power quality

附录

附录 A

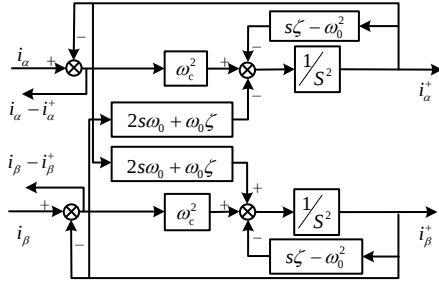


图 A1 二阶正序复数滤波器结构

Fig.A1 Structure of two-order positive-sequence plural filter

图 A1 中 i_{α}^+ 和 i_{β}^+ 分别为交流系统电压 α 轴、 β 轴的正序分量。

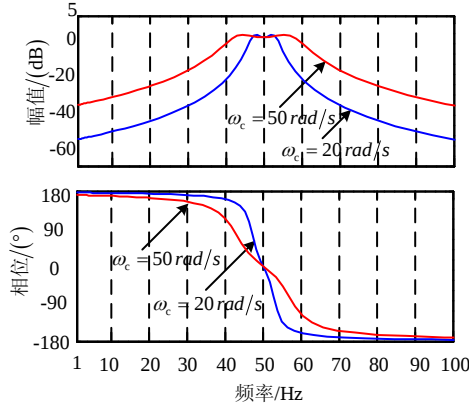


图 A2 正序滤波器波特图

Fig.A2 Potter graph of positive-sequence filter

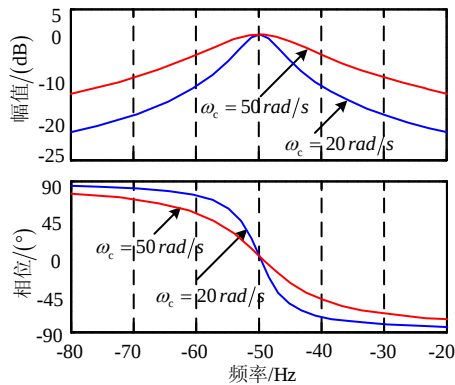
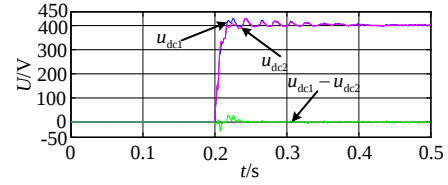
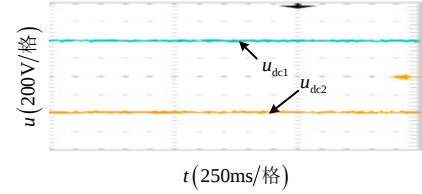


图 A3 负序滤波器波特图

Fig.A3 Potter graph of negative-sequence filter



(a) 仿真平台直流侧上下电容电压波形图



(b) 实验平台直流侧上下电容电压波形图

图 A4 直流侧上下电容电压值

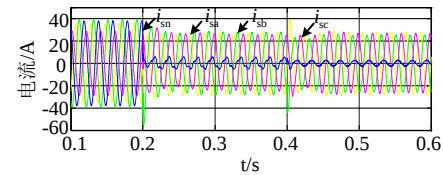
Fig. A4 Up and down capacitance voltage value on DC side

附录 B

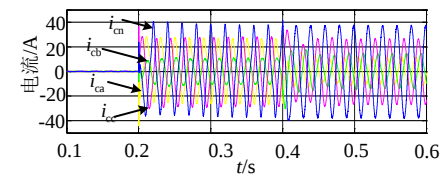
表 B1 三电平逆变器仿真模型参数

Table B1 Simulation parameters of three level inverters

参数	数值
直流母线电压 U_d/V	800
进线电感 L/mH	3
等效电阻 R/Ω	0.2
直流侧电容 $C/\mu F$	10000
开关频率 f_s/kHz	10
三相交流侧线电压 U_g/V	380



(a) 网侧三相电流波形



(b) SPC 输出电流波形

图 B1 仿真结果

Fig.B1 Simulative results

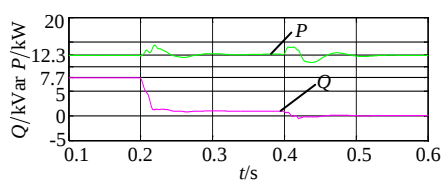


图 B2 系统的有功功率和无功功率

Fig.B2 Active power and reactive power of system

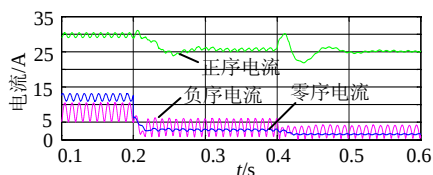


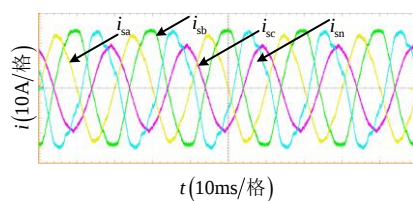
图 B3 系统中的正负零序电流分量

Fig.B3 Positive and negative zero sequence current components in system

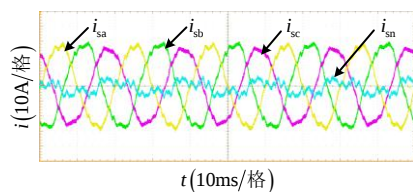


图 B4 SPC 实验平台实物图

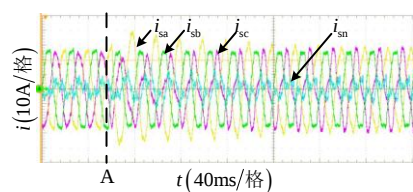
Fig.B4 SPC experimental platform physical map



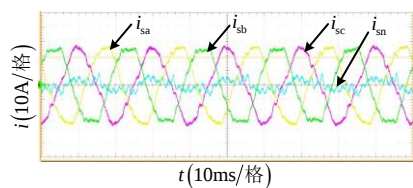
(a) 补偿前三相电网电流波形



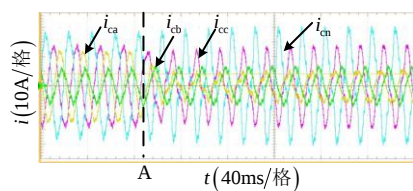
(b) 补偿稳定时三相电网电流波形



(c) 负载变化瞬时三相电网电流波形



(d) 负载变化后补偿稳定时三相电网电流



(e) 负载变化瞬时 SPC 输出电流波形

图 B5 实验结果

Fig.B5 Experimental results