面向三相四线制不平衡负荷补偿的高频链接型D－STATCOM

针对三相四线制系统中非线性、冲击性及不平衡负荷带来的不对称、电压波动和闪变等电能质量问题，提出了一种高频链接型D－STATCOM，用于三相四线制系统的不平衡负荷及无功补偿。分析了D－STATCOM主回路结构特点和工作原理，将其分为并网H桥、高频DC/DC隔离和公共直流母线电容三级结构，并网H桥负责各相的无功补偿，高频DC/DC变换器和公共直流母线电容构成有功交换通道，用于实现不平衡负荷补偿，针对主电路结构特点提出了分相模块化分层控制策略，以简化电路控制，并介绍了各级电路的控制方法。在所建立的仿真模型上进行了多种工况仿真，仿真结果验证了所提出的D－STATCOM电路结构和控制策略的有效性。

崔晓飞　栾　乐　王　勇　许　中／广州供电局有限公司电力试验研究院
田　兵／南方电网科学研究院有限责任公司

崔晓飞／工程师

关键词／Keywords
静止无功补偿·
不平衡负荷补偿·
高频链接·
高频隔离型DC／DC变换器·
比例谐振控制·

0　引言

近年来，大量非线性、冲击性及不平衡负荷（如电弧炉、轧钢机等）接入电力系统，导致电压波动、闪变及不平衡等电能质量问题[1-3]；同时，计算机系统、控制系统和精密仪器等电压敏感型负荷对电能质量要求越来越高[4-5]。使用补偿装置补偿无功，同时补偿不平衡负荷，能够有效改善上述电能质量问题。对于三相不接地系统，基于分相电纳补偿原理的晶闸管控制电抗器＋固定电容器（Thyristor Controlled Reactor ＋ Fixed Capacitor，TCR＋FC）型静止无功补偿装置（Static Var Compensator，SVC）能够实现同时补偿无功和不平衡负荷[6-10]，并得到了大量工程应用，但这种补偿装置含有大量工频电感和电容，体积庞大，并且这种装置本身会产生谐波，需要与滤波装置配合使用，其工作范围也较窄，系统电压降低，需要补偿更多的无功时，这种装置的补偿能力却降低[11]。文献[12-13]提出了一种变压器隔离型链式配电网静止同步补偿器（Distribution Static Synchronous Compensator，D－STATCOM），具有响应快速、谐波含量小以及补偿能力强等优点，但这种装置需要特殊设计的工频隔离变压器，增加了装置成本和体积。

上述补偿装置仅适用于三相三线制系统中，无功和不平衡负荷补偿应尽可能靠近负荷端，而负荷端为三相四线制低压系统。目前，适用于三相四线制系统的补偿装置拓扑结构有三桥臂－分裂电容型、三相四桥臂型和变压器隔离H桥型[14-16]，前两者控制较复杂[17]，难以用于不对称负荷补偿，后者需要三个工频变压器，体积庞大，成本较高。

为解决三相四线制系统中无功和不平衡负荷补偿的问题，本文提出了一种含有高频直流/直流（Direct Current/Direct Current，DC/DC）链接的D－STATCOM结构，电网侧采用三个独立的H桥直接并网补偿无功，无须工频变压器隔离，直流侧通过含高频链接的DC/DC变换器链接到公共直流母线电容，用于交换功率，从而实现不平衡负荷的有功补偿。文献[18]研究表明，随着SiC功率器件和新型磁材料的出现和发展，含高频链接的DC/DC变换电路的变换效率

城市电网与电压暂降敏感用户兼容技术研究（GZHKJ00000002）。

将达到99%，高于工频变压器效率。本文中，H桥采用基于瞬时值反馈的比例谐振（Proportional Resonant，PR）控制，响应快速且在额定频率左右，稳态误差很小[19]，DC/DC变换器采用移相全桥结构，动态响应快速[20]。本文中首先介绍了D－STATCOM的电路结构及工作原理，然后介绍了各个部分的控制策略及无功和不平衡负荷补偿策略，最后建立了仿真模型并进行了系统仿真，仿真结果表明本文提出的D－STATCOM实现了无功及不平衡负荷的同时补偿，并具有体积小、响应快速、注入谐波小、补偿能力强以及功耗低等优点，具有实用化的前景。

1　STATCOM主回路结构及工作原理

高频链接型D－STATCOM主回路结构如图1所示，三相四线制低压配电网给不平衡负荷供电，在没有补偿的情况下，中性线电流不为0。D－STATCOM与负荷并联，并尽可能靠近负荷。H桥逆变器（H－Bridge Inverter，HBI）HBI_{1i}（i＝a，b，c）通过连接电感L_{fi}（i＝a，b，c）并网，HBI_{2i}、HBI_{3i}、高频变压器（High Frequency Transformer，HFT）HFT_i及电感L_i构成DC/DC全桥变换器，与HBI_{1i}的直流侧和公共直流母线电容C_m相连。

分析系统工作原理时忽略装置的损耗，补偿电流i_{ci}（i＝a，b，c）包括无功电流和有功电流，其中无功电流分别补偿各相负荷所需无功电流，补偿电流中的有功部分满足三相之和为0，即部分相从电网吸收有功，而其余相向电网输送有功，用以补偿负荷不平衡有功。吸收有功的相通过H桥和DC/DC全桥变换器向公共直流母线电容充电；向电网输送有功的相从公共直流母线电容吸收有功，由于三相有功补偿电流之和为0，从而可以保证公共直流母线电容电压不变。虽然负荷各相吸收有功和无功均可能存在不同，但经过补偿都可以使网侧电流三相对称，消除中性线电流，且功率因数为1。

2　高频链接型D－STATCOM控制策略

从图1可以看出，高频链接型D－STATCOM主回路含有多个控制器件，因此，控制策略灵活。本文采用分层控制结构，由于三相电路结构一

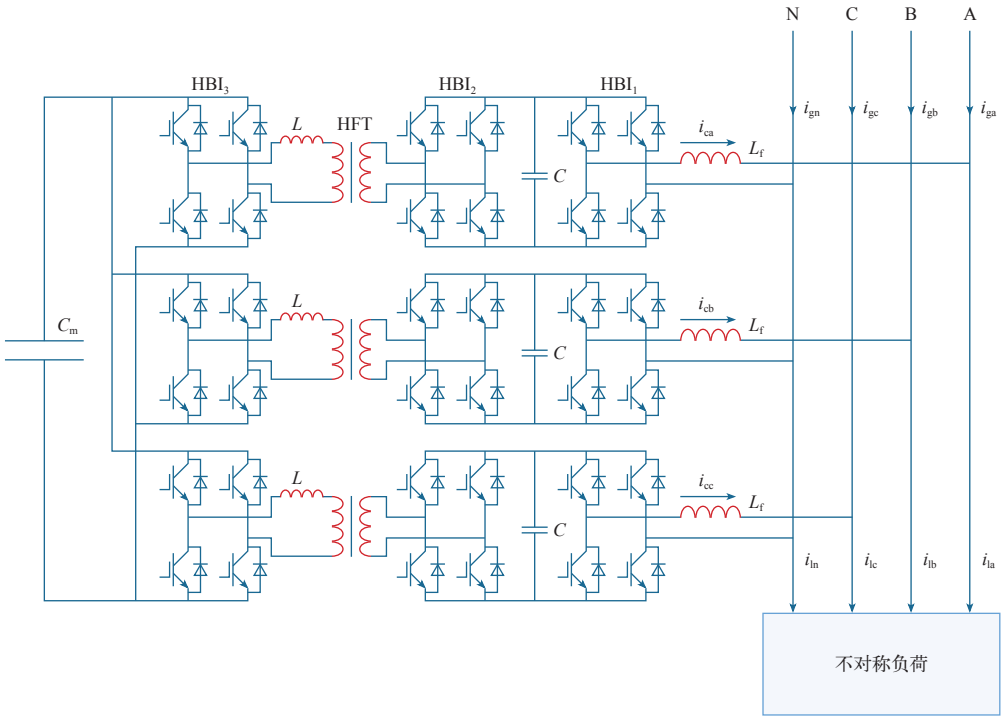


图1　高频链接型D－STATCOM主回路结构

致，底层控制各相完全一样，方便模块化，降低控制的复杂性。

2.1 并网H桥控制策略

并网H桥负责与电网交换有功和无功功率，其控制目标是补偿系统所有无功，并从系统吸收或向系统注入上层控制指定的有功功率。其控制对象为补偿电流i_{ci}（i=a，b，c）。本文采用的控制策略如图2所示。

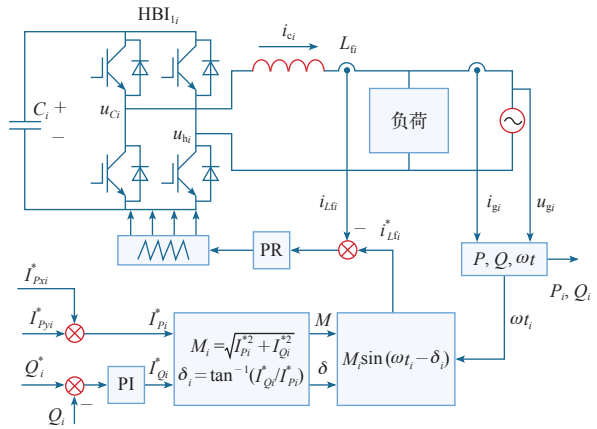


图2 并网H桥控制框图

图2中，H桥直流母线电容C_i的电压u_{Ci}由全桥DC/DC控制器稳定在给定值，控制对象为滤波电感电流i_{Lfi}，其给定值分为有功部分I^*_{Pi}和无功部分I^*_{Qi}。I^*_{Pi}又包括用于维持公共直流母线电容C_m电压部分I^*_{Pxi}和上层控制给出的平衡不对称负荷的部分I^*_{Pyi}；I^*_{Qi}由电网无功外环PI得到，无功给定值Q^*_i一般为0。结合电网电压相位得到滤波电感电流给定值的瞬时值i^*_{Lfi}，然后经过PR控制器得到调制波信号，并经过载波比较得到H桥4个开关管的开关信号。由于电感电流环的给定值为正弦信号，因而可采用PR控制器，在基波频率下无稳态误差，且响应快速。实际中，往往采用具有一定带宽的准PR控制器，即

$$G_{\mathrm{PR}}(s)=K_{\mathrm{P}}+\frac{2K_{\mathrm{I}}\omega_{\mathrm{c}}s}{s^2+2\omega_{\mathrm{c}}s+\omega_0^2} \tag{1}$$

式中，K_{P}为比例调节增益；K_{I}为积分调节增益；ω_{c}为截止频率；ω_0为谐振频率，一般设置为基波频率。

准PR控制器在谐振频率处开环增益为20lg(K_{P}+K_{I})，不再是无穷大，因而在基波频率下会存在稳态误差，但只要开环增益足够大，则稳态误差可控制在允许范围内。取K_{P}=5，K_{I}=500，ω_0=50 Hz，不同ω_{c}下准PR控制器的频率特性如图3所示。

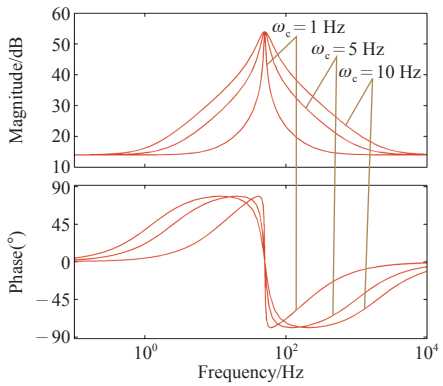


图3 不同ω_{c}时准PR控制器Bode图

图3表明，ω_{c}并不改变谐振频率处的增益，而是影响准PR控制器在谐振频率处的频带宽度。

在设计控制器时，H桥可认为是增益为直流母线电压的一阶惯性环节[21]，即

$$G_{\mathrm{H}}(s)=\frac{u_{Ci}}{1+0.5T_{\mathrm{PWM}}s} \tag{2}$$

式中，T_{PWM}为IGBT的PWM周期。

忽略H桥交流侧高频分量，仅考虑基波分量，则滤波电感电流表示为

$$i_{\mathrm{fi}}(s)=\frac{1}{L_{\mathrm{fi}}s+r_{\mathrm{fi}}}(u_{\mathrm{hi}}-u_{\mathrm{gi}})=G_i(u_{\mathrm{hi}}-u_{\mathrm{gi}}) \tag{3}$$

式中，r_{fi}为滤波电感内阻。

滤波电感电流控制框图如图4所示。

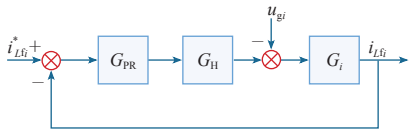


图4 滤波电感电流控制框图

滤波电感电流闭环传递函数为

$$G_{\mathrm{close}}=\frac{G_{\mathrm{PR}}G_{\mathrm{H}}G_i}{1+G_{\mathrm{PR}}G_{\mathrm{H}}G_i} \tag{4}$$

电网电压为扰动输入，电感电流对电网电压的传递函数为

$$G_{\mathrm{ui}}=\frac{G_i}{1-G_{\mathrm{PR}}G_{\mathrm{H}}G_i} \tag{5}$$

若取$\omega_c=1$ Hz，$L_{fi}=0.168$ mH，$r_{fi}=1$ mΩ，开关频率$f=10$ kHz，式（4）、式（5）的频率响应如图5所示。在额定频率50 Hz处，滤波电感电流闭环传递函数幅值增益为－7.383e－8 dB，相位为－0.685°，表明设计的PR控制器能够很好地跟踪电感电流指令值。而对扰动输入的幅值增益始终小于0，且在50 Hz时，增益为－105.7 dB，表明设计的PR控制器能很好地抑制扰动。

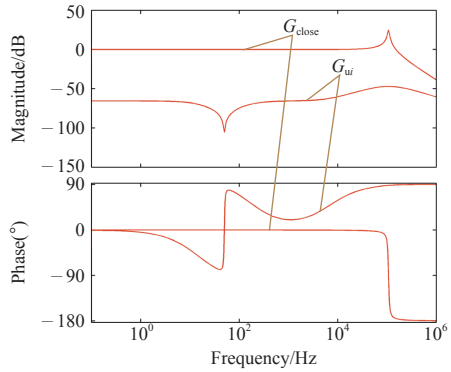


图5　并网H桥闭环控制传递函数Bode图

2.2　双向DC/DC全桥变换器控制策略

双向DC/DC全桥变换器稳定并网H桥直流母线电容电压，其公共直流母线电容C_m由上层控制稳定在额定值，双向DC/DC全桥变换器采用单侧移相控制方法，控制策略如图6所示。图中，u_{Ci}^*为电容电压指令值，与测量值u_{Ci}比较经过PI调节得到移相角α，α取值范围为$-\frac{\pi}{2}\leqslant\alpha\leqslant\frac{\pi}{2}$。双向DC/DC全桥变换器仅采用一级PI调节，控制简单，响应快速。

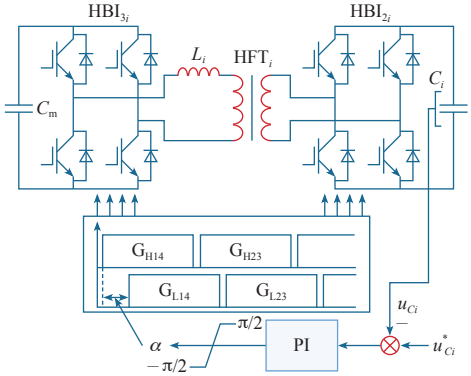


图6　双向DC/DC全桥变换器控制框图

2.3　公共直流母线电容电压控制

公共直流母线电容电压稳定是该装置稳定运行的基础，也是三相不平衡功率交换的媒介，其电压与装置从电网吸收的有功功率大小直接相关。因此，直接将给定值与测量值比较经过PI得到并网H桥有功电流给定值I_{Pxi}^*，如图7所示，且$I_{Pxa}^*=I_{Pxb}^*=I_{Pxc}^*$，即各相对稳定公共直流母线电容电压贡献相同。

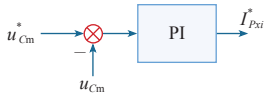


图7　公共直流母线电容电压控制框图

2.4　有功功率平衡控制策略

有功功率平衡是提出的D－STATCOM要实现的重要功能之一。本文采取的有功平衡基本原理是D－STATCOM从电网有功出力小的相吸收有功，以补偿电网有功出力大的相，直至电网各相出力相等。控制策略如图8所示。

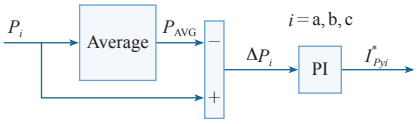


图8　有功功率平衡控制框图

控制器采集电网各相有功功率P_i，并计算三相平均值P_{AVG}，各相功率与平均值作差，得到各相误差值ΔP_i，再经过PI控制器得到并网H桥有功指令电流I_{Pyi}^*。由于ΔP_i满足$\Delta P_a+\Delta P_b+\Delta P_c=0$，且PI控制器为线性运算，则$I_{Pyi}^*$满足$I_{Pya}^*+I_{Pyb}^*+I_{Pyc}^*=0$。即由有功平衡控制策略产生的并网H桥有功指令电流总和为0，并网H桥并不因为有功平衡控制而从电网吸收或注入有功功率。

3　仿真分析

为验证本文提出的D－STATCOM补偿无功和平衡有功的功能，在Matlab/Simulink环境下建立了仿真模型，仿真参数如下表所示。

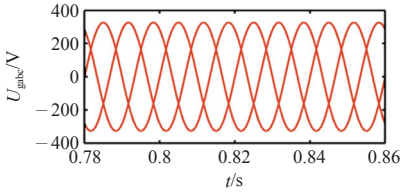
（1）工况一：A相负荷阶跃响应

初始时，三相有功负荷均为10 kW，无功负荷均为5 kvar，在$t=0.8$ s时刻，A相有功负荷阶跃至80 kW，同时，无功负荷阶跃至60 kvar，系统响应

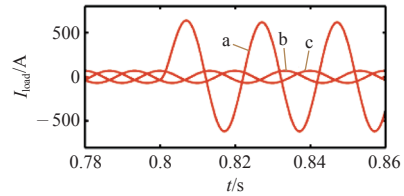
表 仿真参数

参数	数值
额定电压U_b/V	400
额定容量S_b/kV·A	300
滤波电感L_f/mH	0.168
H桥直流母线电容C/mF	5
DC/DC变换器中电感L/mH	0.01
公共直流母线电容C_m/mF	50
DC/DC变换器中HFT电压比	760：380
H桥开关频率/kHz	10
DC/DC变换器开关频率/kHz	10

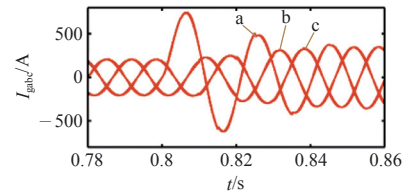
仿真波形如图9所示。



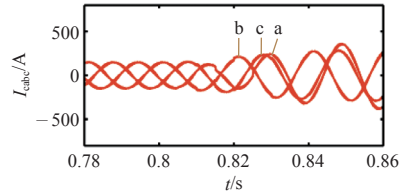
（a）电网电压



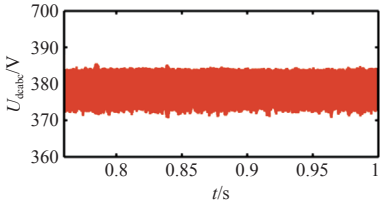
（b）负荷电流



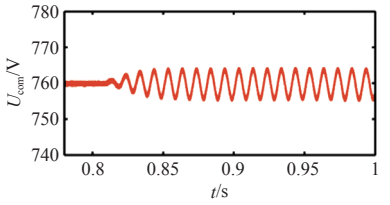
（c）电网电流



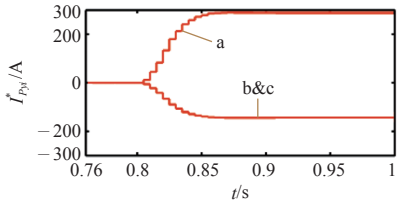
（d）D－STATCOM补偿电流



（e）并网H桥直流母线电容电压



（f）公共直流母线电容电压



（g）控制器有功平衡指令电流

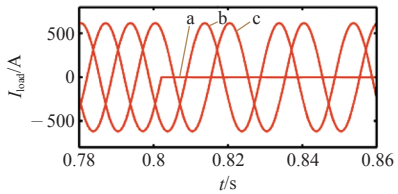
图9 A相负荷阶跃仿真波形

仿真过程中，电网三相电压对称，如图9a所示。图9b中，t=0.8 s前，各相负荷电流对称，且功率因数均为0.89；t=0.8 s后，A相负荷发生阶跃，负荷电流严重不对称，A相功率因数变为0.8。图9c中，t=0.8 s前，在D－STATCOM的补偿作用下，电网电流有效值为146 A，全部为有功电流，且三相电流对称；t=0.8 s后，由于A相负荷突变，电网电流在负荷突变初始时亦会出现严重不对称，但随着D－STATCOM逐步补偿，电网电流最终三相达到对称，有效值247.3 A，且功率因数为1。D－STATCOM补偿电流如图9d所示。图9e表明并网H桥直流母线电容电压在文中采用的控制策略下能够稳定在额定值附近，波动在1.5%以内。图9f表明公共直流母线电容电压也能控制在额定值附近，但负荷发生不对称之后，由于各相通过该电容发生有功交换，导致电容电压比不发生有功交换时大，但波动在1%以内。图9g为控制器发出的有功平衡指令电流，可以看出，A相负荷阶跃后，A相有功补偿电流增大，即D－STATCOM的A相向电网注入有功，而B、C相从电网吸收有功，B、C相指令电流相等且绝对值为A相一半。

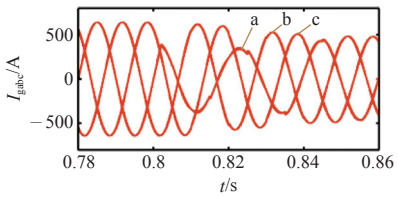
（2）工况二：A相甩负荷响应

初始时，三相负荷有功均为80 kW，无功均为60 kvar，在t=0.8 s时，A相跳闸甩负荷，负荷电流如图10a所示，D－STATCOM迅速补偿不平衡电流，经过约3个周波，使电网三相对称，且功率

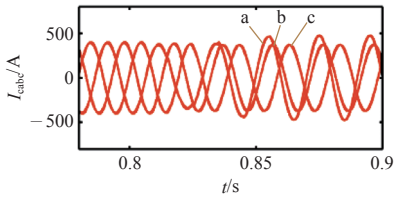
因数为1。电网电流和补偿电流波形如图10b、c所示。公共直流母线电容电压波形如图10d所示，由于有功不平衡补偿需要通过公共直流母线电容交换功率，因此会导致电压小幅波动，仿真中波动小于1%。



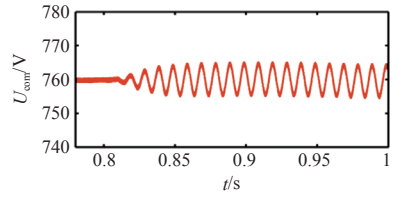
（a）负荷电流



（b）电网电流



（c）D－STATCOM补偿电流



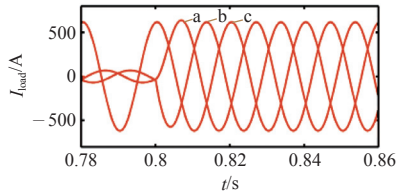
（d）公共直流母线电容电压

图10　A相甩负荷仿真波形

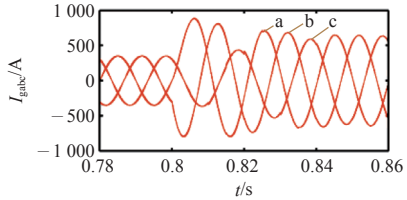
（3）工况三：A、B相阶跃响应

初始时刻，A、B相负荷为0，C相负荷有功80 kW，无功60 kvar；在t＝0.8 s时，A、B两相同时投入80 kW＋60 kvar的负荷，仿真波形如图11所示。

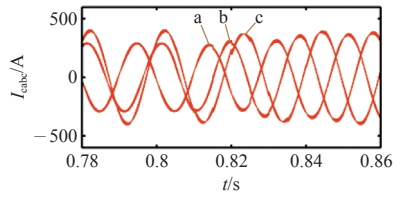
图11表明，负荷由不对称突变转为对称状态时，电网电流在变化前后达到稳态后都能保持三相对称且功率因数为1；图11d表明，由于负荷由不对称转为对称，三相之间交换有功功率减小，公共直流母线电容电压波动也随之减小。



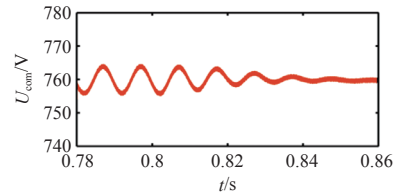
（a）负荷电流



（b）电网电流



（c）D－STATCOM补偿电流



（d）公共直流母线电容电压

图11　A、B相负荷阶跃仿真波形

4　结束语

文中提出了一种新型的面向三相四线制不平衡负荷补偿的高频链接型D－STATCOM拓扑结构，能够补偿负荷不平衡有功和完全补偿负荷无功，且具有较快的响应速度。在该电路实用化的过程中，还有如下几个方面有待研究：

1）该电路结构级数较多，下一步将研究D－STATCOM整体的稳定性以及各级电路参数、控制参数之间的配合关系。

2）高频隔离型DC/DC电路是该D－STATCOM电路的关键环节，下一步将研究如何应用新型电力电子开关器件和新型磁材料以降低电路功率损耗，并研制通用的高频隔离型DC/DC电路模块。

参考文献

[1] 刘小河，赵刚，于娟娟．电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究 [J]．中国电机工程学报，2004，24 (6)：30-34．

[2] 许树楷，宋强，刘文华，等．配电系统大功率交流电弧炉电能质量问题及方案治理研究 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (19)：93-98．

[3] 李兰芳，刘开培，李建奇．点焊机三相不平衡负荷的静止无功补偿 [J]．高电压技术，2010，36 (3)：810-815．

[4] 金燕云，罗毅，涂光瑜．配电系统电压跌落问题的研究 [J]．继电器，2003，31 (10)：56-62．

[5] 赵剑锋，王浔，潘诗锋．用电设备电能质量敏感度测试系统研究 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (22)：32-37．

[6] Gyugyi L，Otto R A，Putrnan T H．Principles and applications of static thyristor-controlled shunt compensator [J]．IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1978，97 (5)：1935-1945．

[7] Akagi H，Kanazawa Y，Nabae A．Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components [J]．IEEE Transactions on Industry Application，1984，20 (3)：625-630．

[8] 伏祥运，王建赜，范伟锋，等．不平衡系统中D－STATCOM的控制策略 [J]．电力系统及其自动化学报，2007，19 (4)：93-99．

[9] 彭劲杰，樊晓平，李刚．新型连续无功补偿装置的设计与仿真 [J]．电力系统及其自动化学报，2013，25 (1)：86-90．

[10] 朱金奇．TCR＋FC型SVC原理及应用 [J]．电气传动自动化，2007，29 (3)：57-65．

[11] 朱永强，刘文华，邱东刚，等．基于单相STATCOM 的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究 [J]．电网技术，2003，27 (8)：42-71．

[12] 许树楷，宋强，朱永强，等．用于不平衡补偿的变压器隔离型链式D－STATCOM的研究 [J]．中国电机工程学报，2006，26 (9)：137-143．

[13] 朱永强，宋强，刘文华，等．用于不平衡负荷补偿的大容量D－STATCOM主电路选择 [J]．电力系统自动化，2005，29 (7)：58-64．

[14] 韦徵，陈新，陈杰，等．三相四桥臂PWM整流器的研究 [J]．电工技术学报，2014，29 (8)：128-134．

[15] 刘永超，杨振宇，姚军，等．三相四桥臂动态无功补偿器仿真研究 [J]．电力自动化设备，2006，26 (11)：24-27．

[16] 段大鹏，江秀臣，孙才新，等．用于不平衡负荷的D－STATCOM数学建模与系统仿真 [J]．高电压技术，2008，34 (8)：1704-1709．

[17] 刘秀翀，张化光，陈宏志．四桥臂逆变器中第四桥臂的控制策略 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (33)：87-92．

[18] 宋强，赵彪，刘文华，等．智能电网中的新一代高频隔离功率转换技术 [J]．中国电机工程学报，2014，33 (36)：6369-6379．

[19] Teodorescu R，Blaabjerg F，Liserre M，et al．Proportional resonant controllers and filters for grid-connected voltage source converters [J]．IEE Proceedings of Electric Power Applications，2006，153 (5)：750-762．

[20] 许海平．大功率双向DC-DC变换器拓扑结构及其分析理论研究 [D]．北京：中国科学院研究生院，2005．

[21] 黄辉．单相 PWM 整流器控制策略研究 [D]．武汉：华中科技大学，2012．

（收稿日期：2015－12－26）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告