级联 DSTATCOM 补偿不平衡负载分相控制策略

王 跃,杨 昆,陈国柱
(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对三相四线制不平衡无功负载的特点,采用正、负序同步旋转变换分别提取基波正序、负序无功分量,同时采用静止坐标系下的分相控制策略,实现配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)补偿模式的灵活性选择,可以只补偿负序、零序分量,充分利用 DSTATCOM 容量优先保证网侧电流平衡,也可在 DSTATCOM 容量允许的情况下同时补偿正序、负序和零序分量,进一步提高网侧功率因数。为提高分相控制的补偿精度且同时保证系统的动态性能,引入改进型的快速重复控制,设计了基于比例积分(PI)控制内环和快速重复控制外环的电流双环控制策略。最后在 MATLAB/Simulink 环境下建立三相四线制 DSTATCOM 仿真模型并搭建实验样机进行验证,仿真和实验结果证明了基于快速重复控制的分相控制策略能实现 DSTATCOM 对不平衡无功的高精度、选择性补偿。

关键词:级联;DSTATCOM;不平衡负载;补偿;同步旋转变换;分相控制策略;快速重复控制;控制
中图分类号:TM 762;TM 714.3 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.004

0 引言

配电网中越来越多的电力机车、轧钢机以及电弧炉等大容量不平衡负荷投入运行,由此引起的电压不平衡、波动及闪变等电能质量问题会给配电网和电力用户造成各种危害。对此,国内外学者进行了广泛深入的研究,其中配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)以其快速的动态响应能力、更宽的运行范围和良好的谐波性能等优势,在不平衡负荷补偿中受到了越来越广泛的关注和应用[1-4]。此外,由 H 桥功率模块级联构成的级联 DSTATCOM 可实现高压大容量化,并且各模块直流侧彼此独立,容易实现均压,同时各功率单元结构相同,便于模块化的设计、安装及维护,非常适合在中高压配电网中应用。

三角形结构的级联 STATCOM 的三相输出电流可独立控制,因此在补偿不平衡负载时受到了更多的关注与研究,但其每相换流链承受电网线电压,因此其级联 H 桥的数目是相同电压等级星形结构的 $\sqrt{3}$ 倍,成本增加。星形结构的级联 STATCOM 受限于三相输出电流之和为零的约束条件,其研究多限于补偿平衡负载的工况[5-6]。通过引入 D/Y 型隔离变压器,星形级联 STATCOM 具有补偿不平衡负载的能力[7-8],但是变压器的引入使其工程应用价值受限。此外,有文献采用基于零序电压叠加的控制方法,取得了较好的补偿不平衡负载的效果,但是零序电压计算方法较复杂,且容易引起系统失稳。

收稿日期:2014-12-14;修回日期:2015-03-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177147);浙江省重点科技创新团队项目(2010R50021)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177147) and Zhejiang Key Science and Technology Innovation Group Program(2010R50021)

三相四线制级联 DSTATCOM 由于可以直接接入电网,省去了复杂的多重化变压器或隔离变压器,同时具有分相不对称补偿能力,因而得到了越来越多的研究[9]。有文献提出分序控制策略[10],需在正序、负序及零序坐标系下分别建模并设计控制器参数,过程繁琐且无法实现选择性补偿。还有一些文献采用基于导纳补偿的分相控制策略[11],但指令电流检测计算复杂,动态性能差,补偿能力有限。

对于三相四线制不对称负载的补偿,在电流跟踪环节无法通过旋转坐标得到直流分量,故需对交流信号直接跟踪,传统比例积分(PI)控制器对无功、谐波等周期性信号直接跟踪时存在静差。基于内模原理的重复控制器因对周期性信号跟踪精度高而在并网逆变器中广泛应用[12-15]。但重复控制以工频周期为步长对误差信号进行修正,动态响应时间长,且需存储一个周期内的误差信息,占用的存储空间大。

本文针对以上分析的不足,基于三相四线制级联 DSTATCOM 可等效为 3 个独立系统的特点,提出静止坐标系下的 DSTATCOM 瞬时电流分相控制策略,在正、负序同步旋转坐标系下分别提取基波正序、负序无功分量,可按照系统容量灵活选择补偿模式。为提高无功补偿精度,引入快速重复控制,设计了基于 PI 控制内环和快速重复控制外环的电流双环控制策略,其中快速重复控制器以工频半周期为步长对误差信号进行调节,动态响应时间更快,所需存储空间减少一半。最后搭建三相四线制 DSTATCOM 仿真模型和实验样机进行验证。

1 三相四线制不平衡负载无功指令提取

DSTATCOM 对配电网不平衡负载补偿的目标是:当补偿容量足够时完全补偿大容量冲击性不对

称负载产生的负序、零序分量和正序无功分量，保证电网电流对称，且只含基波正序有功分量，提高配电网侧的功率因数；当补偿容量不足时优先补偿不对称负载的负序、零序分量，尽量保证电网电流对称[16-17]。

1.1 正、负序同步旋转变换及滑动平均滤波

对于三相四线制不平衡无功负载，根据对称分量法，负载电流可分解为正序、负序和零序分量：

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = I_P \begin{bmatrix} \sin(\omega t+\psi_P) \\ \sin\left(\omega t+\psi_P-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t+\psi_P+\frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + I_N \begin{bmatrix} \sin(\omega t+\psi_N) \\ \sin\left(\omega t+\psi_N+\frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t+\psi_N-\frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + I_0 \begin{bmatrix} \sin(\omega t+\psi_0) \\ \sin(\omega t+\psi_0) \\ \sin(\omega t+\psi_0) \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，ωt 为 a 相电网电压的相位角；下标“P”、“N”和“0”分别表示基波正序分量、负序分量和零序分量；ψ_P、ψ_N 和 ψ_0 分别为正、负、零序初始相位角。

上式中各分量均为交流分量，为提取出指令电流，使用式(2)矩阵对其进行同步旋转变换：

$$\boldsymbol{T}_{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta+2\pi/3) \\ \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{2}$$

经正序同步旋转变换($\theta=\omega t$)，可得：

$$\begin{bmatrix} i_{Ld+} \\ i_{Lq+} \end{bmatrix} = I_P \begin{bmatrix} \cos\psi_P \\ \sin\psi_P \end{bmatrix} + I_N \begin{bmatrix} -\cos(2\omega t+\psi_N) \\ \sin(2\omega t+\psi_N) \end{bmatrix} \tag{3}$$

经负序同步旋转变换($\theta=-\omega t$)，可得：

$$\begin{bmatrix} i_{Ld-} \\ i_{Lq-} \end{bmatrix} = I_P \begin{bmatrix} \cos(2\omega t+\psi_P) \\ \sin(2\omega t+\psi_P) \end{bmatrix} + I_N \begin{bmatrix} -\cos\psi_N \\ \sin\psi_N \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中，下标“+”、“-”分别表示正、负序同步坐标系，“d”、“q”分别表示对应同步坐标系下 d、q 轴分量。

由式(3)、(4)可以看出，在正序同步坐标系下，负载电流基波正序分量变换为 d、q 轴上的直流量，基波负序分量变换为 2 倍工频(100 Hz)的交流分量，零序分量为 0。而在负序同步坐标系下，负载电流基波正序分量变换为 2 倍工频的交流分量，基波负序分量则变换为直流分量，零序分量仍为 0。

为了提取出直流分量，在此引入滑动平均滤波器(MAF)[18]。MAF 的时域数学模型为：

$$x_{ave}(t) = \frac{1}{T_w} \int_t^{t+T_w} x(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

其中，$x(t)$、$x_{ave}(t)$ 分别为 MAF 的输入信号、输出信号；T_w 为 MAF 的滑窗长度。进行离散域的分析时，假设 MAF 的滑窗中包含输入信号的 N 个采样点信息，即 $T_w=NT_s$(T_s 为采样周期)，则 MAF 的离散域描述如式(6)所示，其中 $x(k)$ 为当前采样点信息。

$$x_{ave}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(k-i) \tag{6}$$

将式(6)所示差分方程转换到 z 域中，可得 MAF 的传递函数为：

$$G_{MAF}(z) = \frac{X_{ave}(z)}{X(z)} = \frac{1}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \tag{7}$$

该设计中，MAF 用于滤除 2 倍工频分量，可将 T_w 定为工频周期的 1/2。此时 MAF 的幅值、频率特性曲线及其阶跃、谐波瞬态响应曲线分别如图 1、2 所示。作为对照，给出了截止频率为 30 Hz 的传统二阶低通滤波器(LPF)的对应曲线。

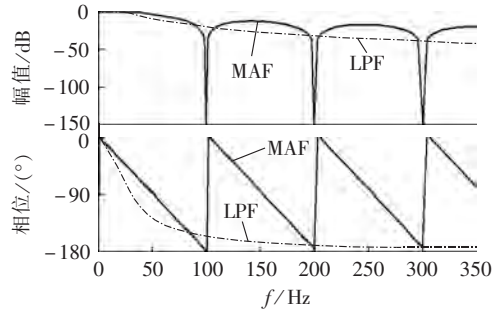

图 1 滑动平均滤波的幅值、频率特性曲线

Fig.1 Magnitude and phase characteristic curves of MAF

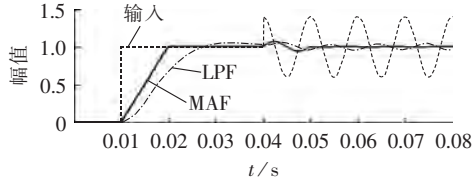

图 2 滑动平均滤波的阶跃、谐波瞬态响应曲线

Fig.2 Transient response of MAF to step change and harmonic

由图 1 可知，MAF 具有完全低通特性，对直流分量既无幅值衰减，也不会引入相位滞后，而对 2 倍工频分量的衰减幅度则比二阶低通滤波器大，滤波效果更好。此外，由图 2 可见，MAF 的阶跃、谐波响应速度均快于二阶低通滤波器，且稳态跟踪误差更小。

1.2 不平衡无功指令选择性提取

综合上述分析及 DSTATCOM 的补偿目标，设计了不平衡负载无功指令的选择性提取方法，如图 3 所示。负载电流分别进行正、负序同步旋转变换后，经 MAF 提取出直流分量再经同步旋转反变换，可实

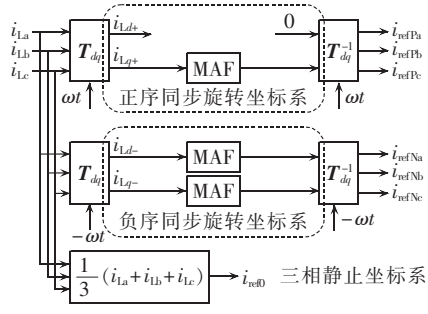

图 3 不平衡负载无功指令的选择性提取方法

Fig.3 Selective acquisition of reactive power reference for unbalanced load

现正序无功分量 i_{refPj} 与负序分量 i_{refNj}(下标 j=a,b,c)的分离,零序分量 i_{ref0} 按照定义法得出。此后,可根据 DSTATCOM 系统容量选择补偿模式。

当容量不足时,优先补偿负序无功和零序无功(即不平衡补偿模式)以保证电网电流平衡(i_{refj} 为无功补偿指令值):

$$i_{refj}=i_{refNj}+i_{ref0} \tag{8}$$

当容量足够时,选择全补偿模式:

$$i_{refj}=i_{refPj}+i_{refNj}+i_{ref0} \tag{9}$$

2　三相四线级联 DSTATCOM 分相控制策略

2.1　级联 DSTATCOM 拓扑结构及数学模型

图 4 为三相四线制级联 DSTATCOM 的主电路拓扑结构,每相由 M 个 H 桥单元级联构成,采用 Y 型接法通过滤波电感 L 接入电网,其中 u_{sj}、i_{sj} 为电网电压、电网电流(下标 j=a,b,c),i_{Lj} 为负载电流;u_{cj}、i_{cj} 分别为 DSTATCOM 输出电压和电流。

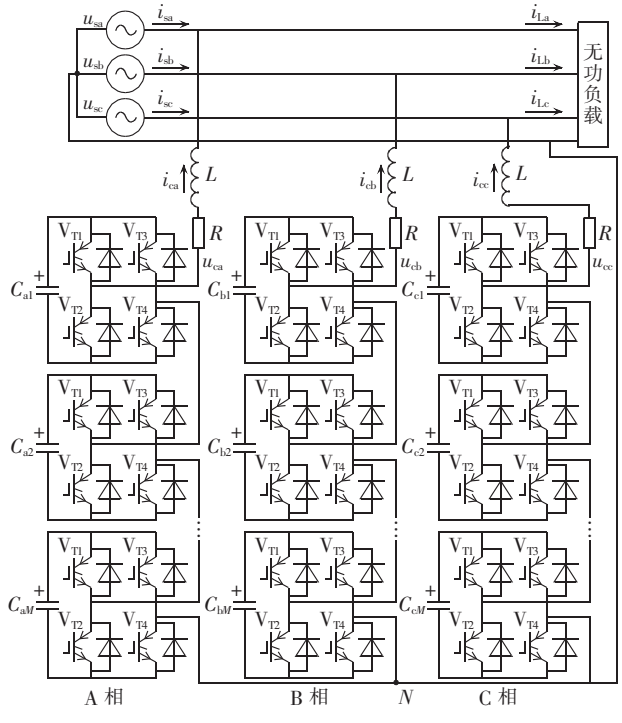

图 4　三相四线制级联 DSTATCOM 拓扑结构

Fig.4　Topology of three-phase four-wire cascaded DSTATCOM

三相四线制级联 DSTATCOM 为三相相互独立的非耦合系统,可以等效为 3 个单相 DSTATCOM,其中分相被控对象的传递函数为:

$$G_P(s)=u_c(s)/i_c(s)=1/(Ls+R) \tag{10}$$

2.2　级联 DSTATCOM 电流控制策略

在 DSTATCOM 分相控制策略中,无功指令 i_{refj} 为交流量,PI 控制跟踪交流量时存在稳态误差,因此引入基于内模原理的重复控制器,设计了基于 PI 控制内环和快速重复控制(FREP)外环的电流双环控制策略,如图 5 所示,其中 $G_P(z)$ 为受控对象,$G_{PI}(z)$ 为内环 PI 控制器的传递函数,PI 控制内环设置滞后一拍环节 z^{-1},模拟采样及计算延时的影响;重复控制外环包括内模发生器、补偿环节 $S(z)$ 及 1/2 基波周期延时环节 $z^{-N/2}$(N 为一个基波周期内的系统采样点数)。双环控制系统中,PI 控制内环为重复控制外环提供一个稳定的控制对象,重复控制则对 PI 控制环的控制误差进行修补,提高闭环系统的控制精度。

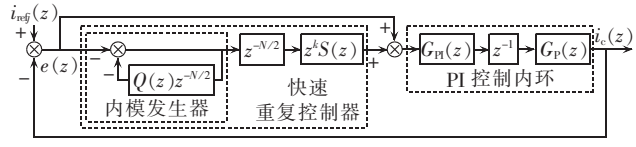

图 5　基于快速重复控制的电流双环控制策略

Fig.5　Double-loop current control based on FREP

在动态响应方面,传统重复控制(REP)需要 N 次采样才能对重复控制的内模进行一次更新,即需要滞后 1 个电网基波周期才能起作用,或者说存在 1 个基波周期的固有延时,而快速重复控制只需要 $N/2$ 次采样就能对重复控制的内模进行一次更新,不仅占用存储空间减少一半,而且固有延时也减少一半。另外,双环控制策略由于误差前馈通道的存在,指令和扰动的动态变化将通过前馈通道直接加载到 PI 控制环上,PI 控制器可以立即对动态变化做出响应,动态响应速度主要取决于 PI 控制内环闭环带宽。因此,PI 控制器既起着为重复控制提供稳定控制对象的作用,又负责系统动态响应速度。

快速重复控制的内模发生器对信号周期性积分,基波和谐波抑制能力良好,在离散域中传递函数为:

$$G_{REP}(z)=\frac{Y(z)}{E(z)}=\frac{1}{1-Q(z)z^{-N/2}} \tag{11}$$

其中,$Q(z)$通常取略小于 1 的常数,用于改善系统稳定性;$z^{-N/2}$ 为 1/2 基波周期延时环节。

补偿器为相位矫正环节 z^k 和二阶滤波环节 $S(z)$ 的串联组合:相位矫正环节用来矫正补偿带宽内的相位滞后,通过 1/2 基波周期延时实现超前矫正;二阶滤波器对高频振荡进行衰减,保证系统的稳定,同时减小对低频段相位补偿的影响。

图 6 给出了补偿前后的内环频率特性对比,可

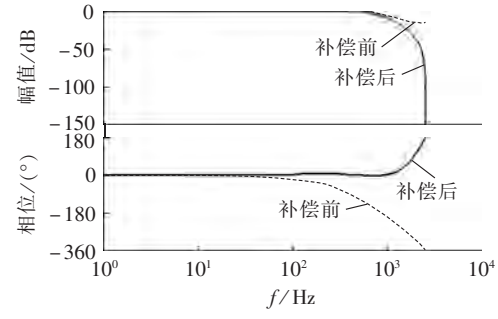

图 6　补偿前后的内环频率特性

Fig.6　Frequency characteristic of inner-loop without and with compensation

以看出,补偿后控制器在更宽频率范围内,实现了对指令零幅值衰减、零相位滞后的跟踪。

2.3 级联 DSTATCOM 直流母线电压均压控制策略

直流母线电压的稳定与均衡,是级联 DSTATCOM 稳定工作的前提条件。直流母线电压控制有 2 个目标:每相直流母线总电压稳压控制;每相相内直流母线电压均衡控制。

直流母线总电压控制是在不外加均压电路的情况下,通过与电网进行有功功率交换来实现,如图 7 所示,其中 u_{dcref} 为单级直流母线电压设定值,u_{dcjm} 为第 $j(j=a,b,c)$相的第 $m(m=1,2,\cdots,M)$级直流母线的电压值。由于被控量为直流量,所以 PI 控制器能很好地完成总直流母线电压控制,总电压控制的输出 i_{dcref_j} 作为第 j 相的有功电流指令。

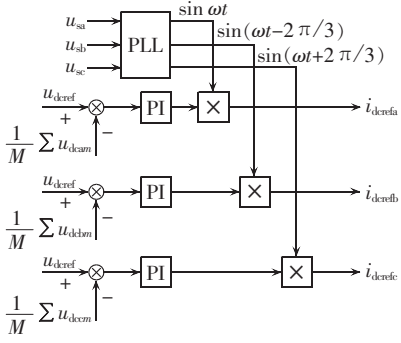

图 7 DSTATCOM 直流母线总电压控制框图

Fig.7 Block diagram of total voltage control for DC-link of DSTATCOM

相内直流母线电压均衡控制则是通过在每个 H 桥的电压调制信号中叠加一个用于均压的电压参考量 $u_{banjm}(j=a,b,c;m=1,2,\cdots,M)$,该电压参考量与装置对应相的输出无功电流同相位或者反相位,此时 H 桥单元会吸收或者释放有功功率,从而达到平衡直流母线电压的目的。

综上所述,级联 DSTATCOM 的分相控制(以 a 相为例)结构如图 8 所示,i_{refa} 为选择性补偿的无功电流指令,i_{dcrefa} 为有功电流指令,i_{ca} 为补偿电流反馈值,分相控制的输出 u_{refam} 则为第 m 级 H 桥单元输出电压的调制信号值。

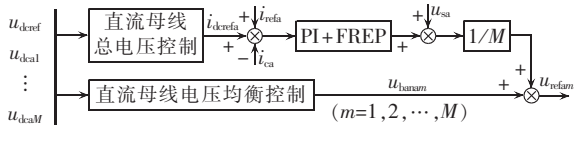

图 8 基于快速重复控制的 DSTATCOM 分相控制策略

Fig.8 Individual phase control based on FREP

3 仿真研究

为验证不平衡无功指令选择性提取方法的正确性以及基于快速重复控制的级联 DSTATCOM 分相控制策略的有效性,利用 MATLAB/Simulink 软件建立 10 kV 的三相四线制级联 DSTATCOM 系统模型进行仿真验证。系统主要参数如下:交流滤波电感 2 mH,直流母线电容 5 mF,开关频率 1 kHz,采样频率 5 kHz,每相级联数为 11,调制方法采用单级倍频载波移相正弦波脉宽调制(CPS-SPWM),每一级直流母线电压指令 u_{dcref} 设定为 900 V,负载为三相四线制不平衡阻感负载。

图 9 为采用传统重复控制和快速重复控制策略时 DSTATCOM 系统的动态性能的仿真结果,其中 i_{ref} 为给定电流指令,i_c 为 DSTATCOM 输出电流。

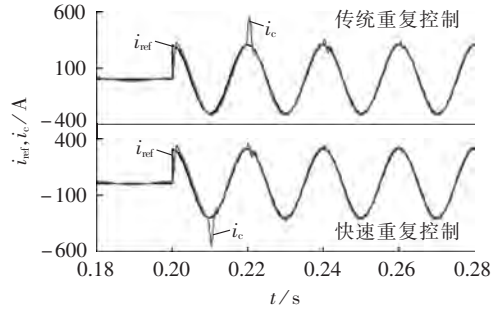

图 9 采用不同重复控制 DSTATCOM 动态性能

Fig.9 Dynamic performance of DSTATCOM for different repetitive controls

仿真时 DSTATCOM 按照给定电流指令空发无功电流,电流指令在 0.2 s 时突变,由图 9 可以看出输出电流立即跟踪指令变化,主要是 PI 控制起作用,但是跟踪误差较大。传统重复控制在指令突变后的第 1 个基波周期内未起作用,从 0.22 s 才投入工作;而快速重复控制只经历了半个基波周期,在 0.21 s 之后便已投入工作,响应速度更快。当重复控制运行稳定后,跟踪误差很小,与理论分析相吻合。

图 10 为 DSTATCOM 补偿不平衡负载时选择性补偿的仿真结果,不同补偿模式下电网电压与电网电流的相位关系如图 11 所示,其中 i_L 为负载电流,i_c 为 DSTATCOM 输出电流,u_s、i_s 分别为电网电压和

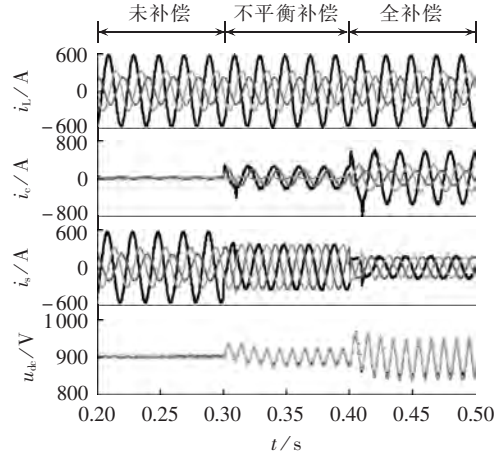

图 10 DSTATCOM 不平衡无功补偿效果

Fig.10 Results of unbalanced load compensation by DSTATCOM

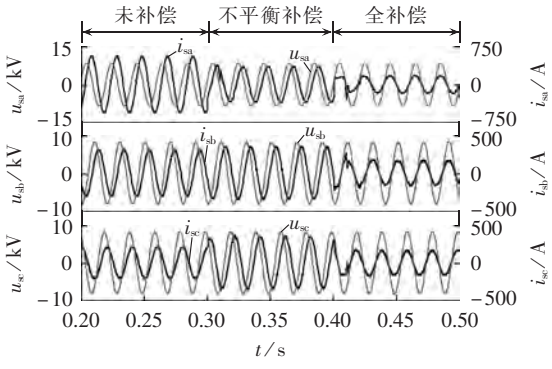

图 11　电网电压与电网电流

Fig.11 Grid voltages and grid currents

电网电流,u_{dc} 为 a 相 11 级 H 桥单元的直流母线电压。

在 0.3 s 之前 DSTATCOM 并不补偿负载无功,此时输出电流很小,主要用于维持装置自身的直流母线电压平衡,网侧电流近似等于负载电流且不平衡;0.3 s 时 DSTATCOM 转入不平衡补偿模式,补偿负序和零序电流,此时网侧电流趋于平衡,但从图 11 可看出电网电压与电网电流间存在相位差,系统功率因数较低;从 0.4 s 开始,DSTATCOM 进入全补偿模式,补偿全部无功电流,此时输出电流增大,电网电流则进一步减小且依旧平衡,同时由图 11 可知电网侧三相电流与对应相的电压几乎同相位,即电网基本只提供负载消耗的有功电流,仿真结果表明稳态时系统功率因数高于 0.98;此外整个过程中,装置各 H 桥单元的直流母线电压均能稳定在电压设定值上下且均衡度好,直流母线电压上 100 Hz 的波动是由无功电流充放电引起,幅值随输出无功电流的增大而增大。

为便于分析,定义三相电网电流的不平衡度 ΔI_s 如式(12)所示,其中 I_{smax}、I_{smin} 分别为三相电网电流有效值的最大值和最小值。

$$\Delta I_s = \frac{I_{smax} - I_{smin}}{I_{smax}} \times 100\% \tag{12}$$

表 1 列出了 DSTATCOM 工作于不同补偿模式稳态时电网电流的分析结果,可以看出进行不平衡补偿以及全补偿时电网电流平衡度很好,且总谐波畸变率(THD)始终小于 2.4%。

表 1　不同补偿模式下补偿效果

Table 1 Results of unbalanced compensation for different compensation modes

补偿模式	电流	有效值/A	THD/%	不平衡度/%
未补偿	i_{sa}	543.6	0.50	61.8
	i_{sb}	305.7	1.13	
	i_{sc}	207.8	1.81	
不平衡补偿	i_{sa}	344.1	1.02	0.61
	i_{sb}	344.3	0.90	
	i_{sc}	342.2	1.13	
全补偿	i_{sa}	164.7	2.36	0.73
	i_{sb}	165.1	2.13	
	i_{sc}	163.9	2.21	

4　实验结果

为进一步验证上述分析,在 380 V 三相四线制电网条件下搭建级联 DSTATCOM 系统:开关频率定为 2.5 kHz,每相级联 3 个 H 桥功率模块,每级直流母线电压设为 200 V,其余主要参数与仿真模型相同。图 12 为不平衡负载的电流波形,三相电流不对称。

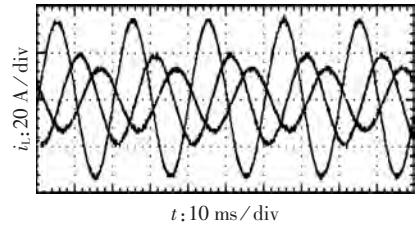

图 12　不平衡负载电流波形

Fig.12 Current waveforms of unbalanced load

图 13 为不平衡补偿模式的实验结果,在补偿负序无功及零序电流之后,电网电流已趋于平衡。但由于正序无功的存在,电网电流有效值较大。

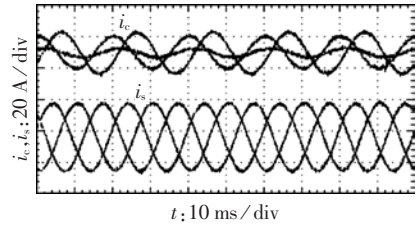

图 13　不平衡补偿模式实验结果

Fig.13 Experimental results of unbalanced compensation mode

图 14 为全补偿模式的实验结果,在补偿全部的无功电流及零序电流后,电网电流仍旧平衡,且有效值进一步减小,此时电网只提供负载所消耗的有功电流部分,电网侧效率大幅提高。

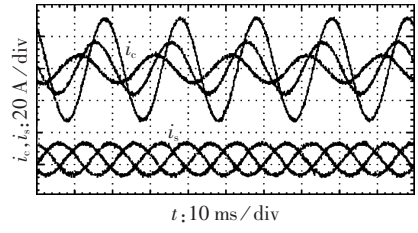

图 14　全补偿模式实验结果

Fig.14 Experimental results of full compensation mode

5　结论

针对三相四线制不平衡无功负载的特点,采用正、负序同步旋转变换分别提取基波正序、负序无功分量,便于根据级联 DSTATCOM 系统容量灵活选择不同补偿模式。

采用静止坐标系下的级联 DSTATCOM 瞬时电流分相控制策略,基于 PI 控制内环和快速重复控制

外环的电流双环控制策略在提高系统的补偿精度的同时保证动态性能,所采用直流母线电压均压方法可实现直流母线电压的稳定与均衡。仿真和实验结果证明了分析的正确性和可行性。

参考文献:

[1] PENG F Z,LAI J S,MCKEEVER J,et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1996,32(5):1130-1138.

[2] BLAZIC B,PAPIC I. Improved D-STATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):225-233.

[3] BARRENA J A,MARROYO L,RODRIGUEZ M A,et al. Individual voltage balancing strategy for PWM cascaded H-bridge converter-based STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(1):21-29.

[4] 刘钊,肖白露,康勇,等. 基于D-STATCOM的串联解耦控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):78-81.
LIU Zhao,XIAO Bailu,KANG Yong,et al. Series decoupling control based on D-STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):78-81.

[5] 王松,谈龙成,李耀华,等. 链式星形STATCOM补偿不平衡负载的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(27):20-27.
WANG Song,TAN Longcheng,LI Yaohua,et al. A control strategy of star-connected cascade circuit STATCOM for unbalanced load [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(27):20-27.

[6] 杨振宇,许胜,许杏桃. 高压大容量D-STATCOM主电路的比较与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):50-55.
YANG Zhenyu,XU Sheng,XU Xingtao. Comparison and analysis of high-voltage large-capacity D-STATCOM main circuit [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):50-55.

[7] 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.
XU Shukai,SONG Qiang,ZHU Yongqiang,et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(9):137-143.

[8] 赵香花,陈远华,刘文华,等. 一种星接链式STATCOM不平衡补偿的新拓扑[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):108-113.
ZHAO Xianghua,CHEN Yuanhua,LIU Wenhua,et al. New topology for unbalance compensation of cascaded STATCOM with star configuration[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):108-113.

[9] 连建阳,谢川,陈国柱. 三相四线级联DSTATCOM高性能控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):55-59.
LIAN Jianyang,XIE Chuan,CHEN Guozhu. High performance control strategy based on three-phase four-wire cascaded DSTATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):55-59.

[10] 杨昆,陈磊,陈国柱. DSTATCOM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 DSTATCOM compensation for unbalanced load[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):36-41.

[11] 马晓军,姜齐荣,王仲鸿,等. 静止同步补偿器的分相不对称控制[J]. 中国电机工程学报,2001,21(1):52-56.
MA Xiaojun,JIANG Qirong,WANG Zhonghong,et al. Unbalanced control based on individual phase for static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(1):52-56.

[12] COSTA-CASTELLÓ R,GRIÑÓ R. Odd-harmonic digital repetitive control of a single-phase current active filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(4):1060-1068.

[13] 周晨,郑益慧,王昕,等. 基于双环控制器的电容分列式三相四线制DSTATCOM控制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):114-121.
ZHOU Chen,ZHENG Yihui,WANG Xin,et al. Control strategy based on dual-loop controller for split-capacitor-type three-phase-four-wire DSTATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):114-121.

[14] 耿攀,吴卫民,叶银忠,等. 基于重复控制的单相分时复合级联光伏逆变器控制[J]. 电工技术学报,2011,26(3):116-122.
GENG Pan,WU Weimin,YE Yinzhong,et al. Single-phase time-sharing cascaded photovoltaic inverter based on repetitive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(3):116-122.

[15] 王跃,杨昆,钟晓剑,等. 基于多同步旋转变换的并联型APF补偿策略[J]. 浙江大学学报:工学版,2013,47(4):705-710.
WANG Yue,YANG Kun,ZHONG Xiaojian,et al. Shunt APF control strategy based on multiple synchronous rotating transform[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2013,47(4):705-710.

[16] 朱永强,王腾飞. 应用于DSTATCOM的负序电流优先补偿策略[J]. 电网技术,2012,36(8):106-110.
ZHU Yongqiang,WANG Tengfei. A negative sequence current preferred compensation strategy applied in DSTATCOM[J]. Power System Technology,2012,36(8):106-110.

[17] 韦钢,陈森环,蔡阳,等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):59-63.
WEI Gang,CHEN Senhuan,CAI Yang,et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive power theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):59-63.

[18] GOLESTAN S,RAMEZANI M,GUERRERO J M,et al. Moving average filter based phase-locked loops:performance analysis and design guidelines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(6):2750-2763.

作者简介:

王 跃

王 跃(1988—),男,安徽合肥人,博士研究生,主要研究方向为大功率级联多电平DSTATCOM及其数字控制技术(**E-mail**:wangyuehfut@163.com);

杨 昆(1987—),男,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向为大功率级联多电平DSTATCOM及电能质量控制技术;

陈国柱(1967—),男,湖北鄂州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为大功率电力电子装置及其数字控制、有源电能质量控制技术及可再生能源发电并网技术。

(下转第50页 continued on page 50)

IEEE,2007:1-10.

作者简介:

许 斌(1982—),男,湖北黄冈人,高级工程师,主要研究方向为直流换流站成套和工程设计(**E-mail**:xubin@csepdi.com);

张志强(1990—),男,湖北当阳人,硕士研究生,主要研究方向为多端直流输电技术(**E-mail**:zhiqiangzhang_sgo@qq.com);

许 斌

文劲宇(1970—),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电能存储与电力安全、多端直流输电与直流电网、新能源并网与规划(**E-mail**:jinyu.wen@hust.edu.cn)。

LCL filters applied in doubly fed induction generator

XU Bin[1],ZHANG Zhiqiang[2],LI Chenghao[2],ZHAN Peng[2],WEN Jinyu[2]

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute,Wuhan 430071,China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,School of Electrical and Electronic Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: The constraints of *LCL* filter parameters are analyzed and it is proposed to connect a star-type *LCL* filter to the GSC(Grid-Side Converter) of DFIG(Doubly Fed Induction Generator) system while a delta-type *LCL* filter to its RSC(Rotor-Side Converter). The parameters of both filters for a 2.5 MW DFIG are given as an example. Simulative results show that,the THD(Total Harmonic Distortion) at the GSC side of DFIG system with the proposed *LCL* filters is reduced to 1.70% while that at its RSC side is reduced to 1.64%,which are much lower than those of DFIG system with *L* filters.

Key words: wind power; wind turbines; doubly fed induction generator; electric converters; *LCL* filter; parameter design; harmonic analysis

(上接第28页 continued from page 28)

Individual phase control of cascaded DSTATCOM for unbalanced load compensation

WANG Yue,YANG Kun,CHEN Guozhu

(College of Electrical Engineering,Zhejiang University,Hangzhou 310027,China)

Abstract: According to the property of three-phase four-wire unbalanced reactive load,the positive-sequence or negative-sequence synchronous rotating transformation is employed to acquire the positive-sequence or negative-sequence reactive current respectively,while the individual phase control under stationary coordinates is adopted to flexibly select the compensation scheme of DSTATCOM(Distribution STATic synchronous COMpensator),either to only compensate the negative-sequence and zero-sequence currents for fully utilizing the capacity of DSTATCOM to ensure the grid-side current balance,or to simultaneously compensate the negative-sequence,zero-sequence and positive-sequence currents under the rated capacity of DSTATCOM to improve the grid-side power factor. In order to improve the compensation accuracy without sacrificing the dynamic performance of system,the improved FREP(Fast REPetitive) control is used in the design of double-loop current control based on the proportional integral inner loop and the FREP outer loop. The MATLAB/Simulink model of three-phase four-wire DSTATCOM is constructed and the experimental prototype is built for the verification. Both simulative and experimental results show that the accurate and selective compensation of unbalanced reactive power is achieved by the DSTATCOM under the FREP-based individual phase control.

Key words: cascaded; DSTATCOM; unbalanced load; compensation; synchronous rotating transform; individual phase control strategy; fast repetitive control; control