

DOI: 10.7667/PSPC151026

基于序分量法的 D-STATCOM 直接功率控制策略研究

陈奎, 周东, 孙建坡

(中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要: 将基于序分量法的 P-DPC 引入到配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)的控制研究中, 来解决传统预测直接功率控制策略只可控制补偿负荷无功功率的问题。将电网电压不对称因素考虑在内, 利用瞬时对称分量法对各个采集电气量进行序分解, 构建正、负序等效电路。无功和三相不平衡负荷补偿时, 根据序网络等效电路分别推得正、负序功率预测模型。基于正序功率预测模型的 P-DPC 算法控制 D-STATCOM 补偿负荷无功, 而基于负序功率预测模型的 D-DPC 算法控制补偿负荷所需负序电流。两种算法相互牵制, 严格控制了 D-STATCOM 的输出电流, 消除了装置在电网电压不对称时可能产生的过流威胁, 实现了负荷无功和平衡化补偿。仿真结果表明, 不论电网电压对称与否, 该控制策略都能良好地补偿负荷的无功和负序电流, 确保电源侧三相电流平衡且单位功率因数运行。

关键词: 预测直接功率控制; 瞬时对称分量法; 电压不对称; 负荷平衡化补偿; 叠加

Study on predictive direct power control of D-STATCOM based on the method of sequence component

CHEN Kui, ZHOU Dong, SUN Jianpo

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Predictive direct power control (P-DPC) strategy based on sequence component method is introduced to control static synchronous compensator of distribution network, so as to solve the incapability of compensation of three-phase unbalanced load current. Taking the influence of negative voltage into account, first of all, instantaneous symmetrical component method is applied to every electrical measurements to construct sequence equivalent circuit. Then positive and negative sequence power predictive models can be deduced. The P-DPC based on positive power predictive model is used in D-STATCOM to compensate reactive power; and the negative predictive model is adopted to realize the compensation of negative load current. Two different control strategies are combined to regulate the output current of D-STATCOM strictly, as a result, the threat of converter overcurrent caused by negative voltage is eliminated and the compensation of reactive power and negative load current is achieved. Simulation results verify the validity of the proposed control strategy even under unbalance voltage.

Key words: P-DPC; instantaneous symmetrical component; asymmetrical voltage; load balancing compensation; principle of superposition

0 引言

随着人们对配电网供电可靠性和电能质量要求的提高^[1], 配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)作为柔性交流输电技术(FACTS)家族成员的重要装置之一, 因其能有效解决电压波动与闪变、三相电压不平衡等电能质量问题^[1]而成为近年的研究热点。传统的D-STATCOM控制器的设计一般都基于三相电压对称、负荷三相平衡的假设, 然而, 实际配电

网中的电压不对称现象普遍存在, 与此同时, 考虑到大量交流电弧炉^[2]、电力机车等不平衡负荷的接入以及随机单相负荷的存在, 配电网的三相负荷通常也是不平衡的。因此, 传统的采用坐标变换和有功、无功解耦控制的控制策略急需改进。

直接功率控制凭借优良的静、动态性能, 静止 $\alpha\beta$ 坐标下有功、无功功率的解耦控制^[3]被广泛应用于三相并网逆变器^[4]、PWM整流器^[5]的控制中。本文尝试着将直接功率控制应用到不对称电网下三电

平 D-STATCOM 负荷平衡化补偿控制中。直接功率控制大体可分为基于开关表的变开关频率 DPC 和基于预测模型的固定开关频率 P-DPC, 它们各有自己的优势和不足。文献[6]提出根据稳态、暂态选择不同的矢量序列分别计算各个矢量的作用时间来保证稳定性, 同时加快了系统的动态响应快速性, 然而, 该算法不仅算法复杂、对控制器要求高, 而且无法保证矢量的作用时间都大于零和存在局部最优解问题^[7], 文献[8]采用 SVPWM 模块取代矢量时间计算使算法大为简化。文献[9]利用 P-DPC 算法来映射电网负序电压抑制 D-STATCOM 装置过流, 但无法补偿负荷的负序电流。文献[10]根据正、负序等效电路采用正、负序补偿电流叠加控制补偿负荷无功功率和负序电流, 但忽视了电压不对称可能带来的危害。

本文首先简单介绍了预测直接功率控制的理论背景, 基于此, 提出利用瞬时对称分量法^[11]将电压、电流序分解, 根据 D-STATCOM 正、负序网络等效电路分别构建正序预测直接功率控制环和电网虚拟负序电压下的预测直接功率控制环。正序预测直接功率控制环补偿负荷无功功率和映射电网负序电压, 虚拟负序预测直接功率控制环调节 D-STATCOM 输出负序电流平衡三相负荷。正、负序预测功率控制双环叠加严格控制了 D-STATCOM 的输出电流, 提升了装置在复杂电网条件下的生存性和鲁棒性。

1 基于 P-DPC 的三电平 D-STATCOM 运行分析

1.1 预测直接功率控制原理分析

图 1 所示为 P-DPC 控制 D-STATCOM 补偿负荷无功功率原理图, 根据当前控制周期电网电压 \hat{e}_s 、逆变器输出电流 \hat{i}_c 、直流侧两电容电压 V_{dc1} 、 V_{dc2} 的采样值计算实际有功功率、无功功率的反馈值以及直流侧有功给定值, 通过求得的功率偏差计算出下一控制周期逆变器输出电压值^[12]。

由瞬时无功功率理论可知, 对于三相对称交流系统, D-STATCOM 装置输出瞬时功率在静止 $\alpha\beta$ 坐标下可表示为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{s\alpha} & e_{s\beta} \\ e_{s\beta} & -e_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: p 、 q 分别为系统瞬时有功功率和无功功率; $e_{s\alpha\beta}$ 、 $i_{c\alpha\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下网侧电压和 D-STATCOM 输出补偿电流。

1.2 功率预测模型

假设系统的采样周期为 T_s , 考虑 T_s 远小于电网电压周期, 可近似认为相邻两个采样周期内电压值相等, 可求得离散化后第 k 个采样周期内瞬时复功率的变化量^[12]为

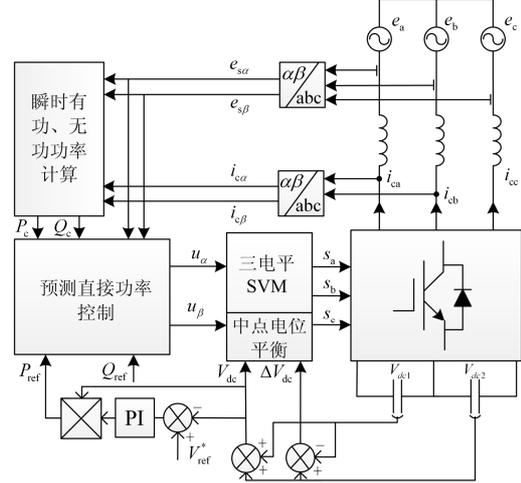


图 1 直接功率控制三电平 D-STATCOM 原理图

Fig. 1 System block diagram of P-DPC controlled three-level D-STATCOM

$$\begin{bmatrix} \Delta p(k) \\ \Delta q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{s\alpha}(k) & e_{s\beta}(k) \\ e_{s\beta}(k) & -e_{s\alpha}(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c\alpha}(k+1) - i_{c\alpha}(k) \\ i_{c\beta}(k+1) - i_{c\beta}(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

又因为本文验证的是低压配电网, 忽略交流侧电阻的影响, 将系统的状态方程采用向前差分离散化处理:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}(k+1) - i_{c\alpha}(k) \\ i_{c\beta}(k+1) - i_{c\beta}(k) \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L} \begin{bmatrix} u_{\alpha}(k) - e_{s\alpha}(k) \\ u_{\beta}(k) - e_{s\beta}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)并化简得:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}(k) \\ u_{\beta}(k) \end{bmatrix} = \frac{L}{T_s \|\hat{e}_s\|^2} \begin{bmatrix} e_{s\alpha}(k) & e_{s\beta}(k) \\ e_{s\beta}(k) & -e_{s\alpha}(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^*(k+1) - P(k) \\ Q^*(k+1) - Q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha}(k) \\ e_{s\beta}(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由上式可知, 将电网电压当作常量, 如果已知瞬时功率的变化量, 就可以得到 STATCOM 装置的电压调制信号, 经空间矢量脉宽调制模块调制后输出功率开关器件的控制信号, 从而实现系统瞬时功率的增减控制^[8]。

2 基于序分量法的不平衡负荷补偿

2.1 不平衡电网电压条件下无功功率和负序电流补偿

当电网电压不对称或三相负荷不平衡时, 无功负荷都会产生负序电流分量, 由 D-STATCOM 进行

负荷平衡化补偿时需其发出负序电流。与此同时, 文献[13]论述了对于三相不对称量来说, 经 Clark 变换后的 α 、 β 分量并不正交, 在静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的有功、无功功率解耦控制受到挑战。

针对上述种种不利, 提出采用瞬时对称分量法^[11]将 PCC 处的电压、电流采集电气量进行序分解, 根据 D-STATCOM 正、负序网络等效电路分别构建电网电压正序和电网虚拟负序电压下的预测直接功率控制环, 正序环补偿负荷无功功率和映射电网负序电压, 虚拟负序环补偿负荷所需负序电流, 正、负序网络等效电路图如图 2 所示。

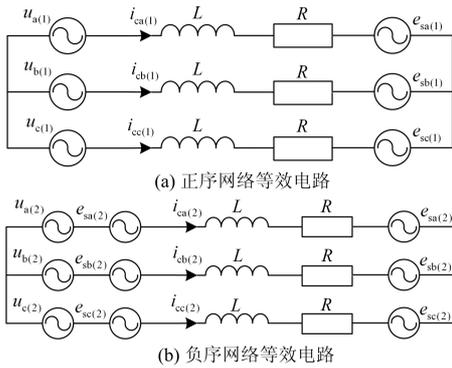


图 2 预测直接功率控制 D-STATCOM 序网络图

Fig. 2 Sequence equivalent circuit of P-DPC controlled three-level D-STATCOM

当 D-STATCOM 公共连接点处三相电压、电流不对称时, 瞬时有功、无功功率表达式为

$$s = p + jq = e_{\alpha\beta} i_{c\alpha\beta}^* = e_p i_p e^{j(\gamma-\phi)} + e_N i_N e^{j(\varphi-\delta)} + e_p i_N e^{j(2\omega t + \gamma + \varphi)} + e_N i_p e^{-j(2\omega t + \delta + \phi)} \quad (5)$$

其中: $e_{\alpha\beta} = e_p e^{j(\omega t + \gamma)} + e_N e^{-j(\omega t + \delta)}$; $i_{c\alpha\beta} = i_p e^{j(\omega t + \phi)} + i_N e^{-j(\omega t + \varphi)}$, 分别为电网电压和补偿电流正、负序在静止 $\alpha\beta$ 坐标系中空间矢量的表达形式。

由公式(5)可知, 在一定的电网电压条件下, D-STATCOM 补偿电流在不对称电网电压下瞬时功率的直流分量就足以表征正、负序补偿电流的幅值和相位信息。因而, 只需控制 PCC 处瞬时功率的直流成分就可以控制装置发出满足要求的正、负序补偿电流^[14]。

2.2 无功电流补偿

对图 2(a)所示的正序网络等效电路施用同样的 P-DPC 控制原理理论推导, 有所不同的是此时各个电压、电流值不再是瞬时采样值而是经瞬时对称分量法计算后的正序分量瞬时值, 求得逆变器输出正序电压表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(1)}(k) \\ u_{\beta(1)}(k) \end{bmatrix} = \frac{L}{T_s \|\dot{e}_{s(1)}\|^2} \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) & e_{s\beta(1)}(k) \\ e_{s\beta(1)}(k) & -e_{s\alpha(1)}(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} P^*(k+1) - P(k) \\ Q^*(k+1) - Q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) \\ e_{s\beta(1)}(k) \end{bmatrix}$$

式中, 功率反馈值为正序补偿电流在正序电网电压下的瞬时功率值, 为恒定的直流分量。将式(6)两边同时加上电网负序电压得:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(1)}(k) \\ u_{\beta(1)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha(2)}(k) \\ e_{s\beta(2)}(k) \end{bmatrix} = \frac{L}{T_s \|\dot{e}_{s(1)}\|^2} \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) & e_{s\beta(1)}(k) \\ e_{s\beta(1)}(k) & -e_{s\alpha(1)}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^*(k+1) - P(k) \\ Q^*(k+1) - Q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) \\ e_{s\beta(1)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha(2)}(k) \\ e_{s\beta(2)}(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

令

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(1)}(k) \\ u_{\beta(1)}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha(1)}(k) \\ u_{\beta(1)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha(2)}(k) \\ e_{s\beta(2)}(k) \end{bmatrix}$$

整理得

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(1)}(k) \\ u_{\beta(1)}(k) \end{bmatrix} = \frac{L}{T_s \|\dot{e}_{s(1)}\|^2} \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) & e_{s\beta(1)}(k) \\ e_{s\beta(1)}(k) & -e_{s\alpha(1)}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^*(k+1) - P(k) \\ Q^*(k+1) - Q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha}(k) \\ e_{s\beta}(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中的有功参考值用来支撑直流侧电压, 无功参考值用来补偿负荷无功功率, 电网的负序电压通过上式映射到逆变器交流侧抑制装置过流威胁。

2.3 三相负荷不平衡补偿

根据以上基于正序网络等效电路的预测直接功率控制理论的推导可得如图 2(b)所示负序网络等效电路, 忽略交流侧电阻的影响, 求得其离散化后的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(2)}(k) \\ u_{\beta(2)}(k) \end{bmatrix} = \frac{L}{T_s} \begin{bmatrix} i_{\alpha(2)}(k+1) - i_{\alpha(2)}(k) \\ i_{\beta(2)}(k+1) - i_{\beta(2)}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(9)进行改写

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(2)}(k) \\ u_{\beta(2)}(k) \end{bmatrix} = \frac{L}{T_s \|\dot{e}_{s(1)}\|^2} \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) & -e_{s\beta(1)}(k) \\ -e_{s\beta(1)}(k) & -e_{s\alpha(1)}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) & -e_{s\beta(1)}(k) \\ -e_{s\beta(1)}(k) & -e_{s\alpha(1)}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha(2)}(k+1) - i_{\alpha(2)}(k) \\ i_{\beta(2)}(k+1) - i_{\beta(2)}(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

记

$$\begin{bmatrix} P_V^*(k+1) - P_V(k) \\ Q_V^*(k+1) - Q_V(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) & -e_{s\beta(1)}(k) \\ -e_{s\beta(1)}(k) & -e_{s\alpha(1)}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha(2)}(k+1) - i_{\alpha(2)}(k) \\ i_{\beta(2)}(k+1) - i_{\beta(2)}(k) \end{bmatrix}$$

其中, P_V^* 、 Q_V^* 和 P_V 、 Q_V 为虚拟负序电网电压下的虚拟有功、无功功率反馈值以及参考值, 为恒定直流量。此处采用电网电压正序分量来构建虚拟负序分量是考虑到配电网负序电压的不确定性, 并且如果瞬时复功率为 2 倍交流流量时会在逆变器交流侧映射出三次谐波分量, 引起输出电流畸变, 将上式代入式(10)得:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(2)}(k) \\ u_{\beta(2)}(k) \end{bmatrix} = \frac{L}{T_s \|\dot{e}_{s(1)}\|} \begin{bmatrix} e_{s\alpha(1)}(k) & -e_{s\beta(1)}(k) \\ -e_{s\beta(1)}(k) & -e_{s\alpha(1)}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_V^*(k+1) - P_V(k) \\ Q_V^*(k+1) - Q_V(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(8)的正序电压调制信号与式(11)的负序电压调制信号相叠加作为三电平空间矢量脉宽调制模块的输入, 产生的 PWM 驱动信号控制相应的 IGBT 模块导通与关断, 基于序分量法的 P-DPC 三电平 STATCOM 控制原理图如图 3 所示。

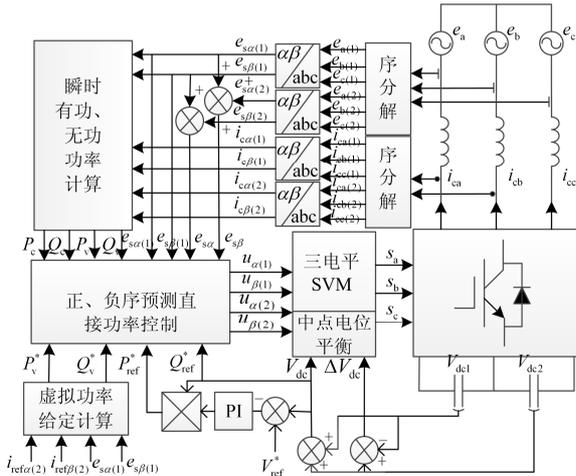


图 3 基于序分量法的预测直接功率控制

Fig. 3 P-DPC control strategy based on the method of sequence component

将电网电压和 D-STATCOM 装置的输出电流经信号调理和采样滤波后送入序分解模块, 其功能是实现三相采集电气量的正、负序快速分离, 具体的分解算法可以参考文献[11], 然后将获得的各序分量变换到静止 $\alpha\beta$ 坐标系下以便进行瞬时功率的计算。瞬时功率计算模块的输出即为正、负序直接功率预测模型的实时反馈值, 虚拟功率给定计算模块的作用是根据参考负序补偿电流和电网正序电压进

行虚拟功率的给定计算, 此处的虚拟一词体现在: 瞬时功率计算中的电压矩阵次对角线是正序电压 β 轴分量的相反数来模拟电网负序电压矩阵。主控模块将各个反馈值和参考值作差后进行正、负序电压调制信号的计算送入空间矢量脉宽调制模块, SVPWM 模块^[15]实现功率开关器件控制信号的分配和直流侧中点电位的平衡。如果不需对负荷负序电流进行补偿时还可以将虚拟功率给定值设为零, 当电网电压不对称时, 其可以抑制直流侧电压 2 倍频脉动在交流侧引入的负序电流^[16], 确保输出电流三相平衡。

双环叠加控制维持了直流侧电容电压恒定、中点电位平衡, 抑制了电网负序电压对 D-STATCOM 装置产生可能的过流威胁, 提供了所需的无功功率和负序补偿电流, 实现了配电网的无功补偿和三相负荷平衡。然而, 实际系统中由采样滤波、序分解中的低通滤波器、功率计算等引入的控制延时会系统的运行性能产生一定的影响, 如何限制控制延时, 加快系统响应快速性仍需进一步深入研究。而且系统的安全稳定运行是在逆变器交流侧没有发生过调制的情况下, 也就是说存在最大电网电压不对称度和三相负荷最大不平衡度, 这两个参数必须折中选取。

3 仿真实验

3.1 仿真模型参数

首先在 Matlab/Simulink 软件平台下搭建了一台容量为 80 kvar 的三电平配电网静止无功补偿器模型对上述所提控制策略进行仿真对比研究, 实验系统的具体仿真参数列于表 1。

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model	
参数名	数值
三相系统线电压有效值/V	380
直流侧上、下电容电压值/V	600
直流侧上、下电容值/mF	4.8
交流侧等效耦合电感值/mH	6
交流侧等效耦合电阻值/ Ω	0.02
开关频率/kHz	5
采样频率/kHz	10
DSTATCOM 无功补偿范围/kvar	± 80

仿真软件平台下的 Simpowersystem 模型库中包含所有所需的主电路功能模块, 按照上表所给出的模型参数设置好后根据原理图 3 搭建仿真模型。控制电路模型搭建的原理思路是利用三相电气值测量模块对各路电压、电流值进行采样, 经信号调理

电路处理后, 采用零阶保持器对采集的电气量进行离散数字量处理后作为序分解模块的输入, 然后将获得的正、负序瞬时值分别进行瞬时功率计算作为主控模块的反馈输入, 主控模块的功能是根据给定功率值与反馈输入值的偏差计算出三相电压调制信号, 经 SVPWM 算法模块后输出开关器件的控制信号^[7]。

3.2 三相负荷平衡化补偿

对电网电压对称和不对称两种工况下负荷平衡化补偿进行仿真验证, 图 4 为配电网三相电压对称时, 三电平 D-STATCOM 运行波形图。由图 4(a) 可知, 在 0.05 s 时刻静止无功补偿器投入运行补偿负荷无功功率, 在 0.15 s 时虚拟负序预测直接功率控制环切入对负荷进行平衡化补偿, 实现了电源侧

电流三相对称且单位功率因数运行, 在 0.35 s 时另一无功负荷接入; 图 4(b)、图 4(c) 为补偿电流波形和相应 a 相电流频谱图, 无功补偿时 THD 为 0.66%, 负序电流补偿时 THD 为 1.06%, 且以 3 次和 5 次谐波居多, 与文献[9]中的控制策略相比, 谐波含有率明显减小, 输出波形畸变得得到大大缓解; 图 4(d) 为电源侧瞬时功率响应波形, 实现无功补偿后, 瞬时无功曲线在零值附近以 2 倍频波动; 平衡化补偿后, 曲线稳定在了零刻度线; 负载突变后, 经两个周波后重新进入稳态, 动态响应性能较好; 图 4(e) 为直流侧电压波动和中点电位波形, 可以发现, 此时的电容电压波动率为 0.8%, 基本维持了直流侧电压恒定, 中点电位波动幅值限制在了 20 V 以内, 满足了系统正常运行的要求。

图 5 为电网电压不对称时系统运行波形图, 因为电力系统公共连接点正常电压不平衡度为 2%, 短时不允许超过 4%。为不失一般性, 选取电压不平衡度 4%, 不对称电压波形如图 5(a)。由图 5(b) 可知, 即使电压不对称时, 仍能保证电源电流三相对称且单位功率因数运行; 图 5(c) 为补偿电流波形和相应 a 相电流频谱图, 无功补偿时 THD 为 0.76%, 负序电流补偿时 THD 为 1.11%, 相对于电压对称时, 谐波含有率只略有增加; 通过图 5(e)、图 5(f) 可以发现, 电源侧瞬时复功率在实现补偿后仍存在 2 倍频功率脉动; 电压不对称时, 直流侧的电压波动率为 0.5%, 中点电位仍能维持平衡。

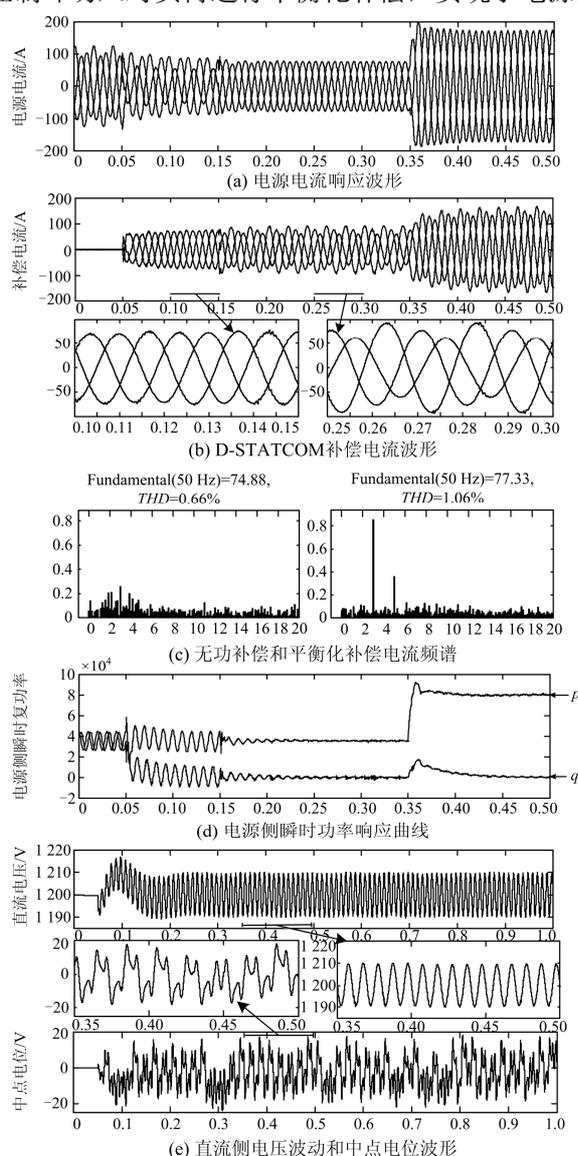
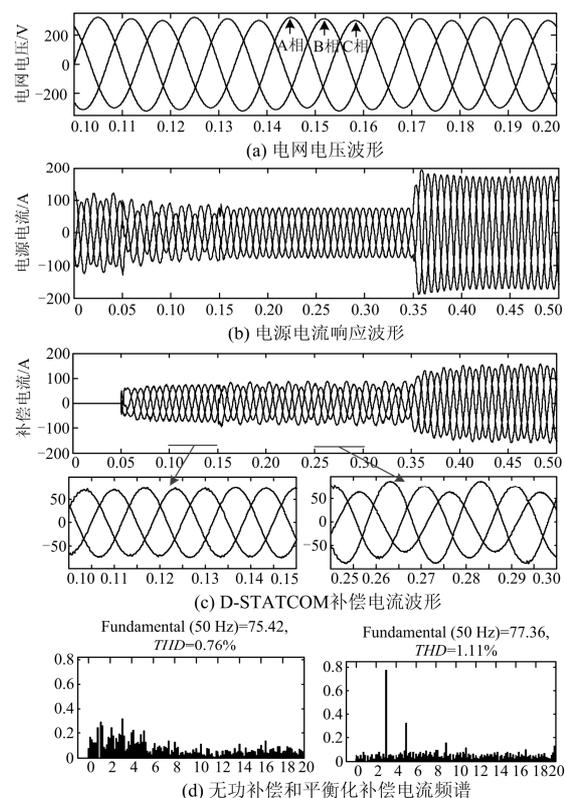


图 4 三电平 D-STATCOM 在电压对称时运行情况

Fig. 4 Operation of three-level D-STATCOM under balance condition



(d) 无功补偿和平衡化补偿电流频谱

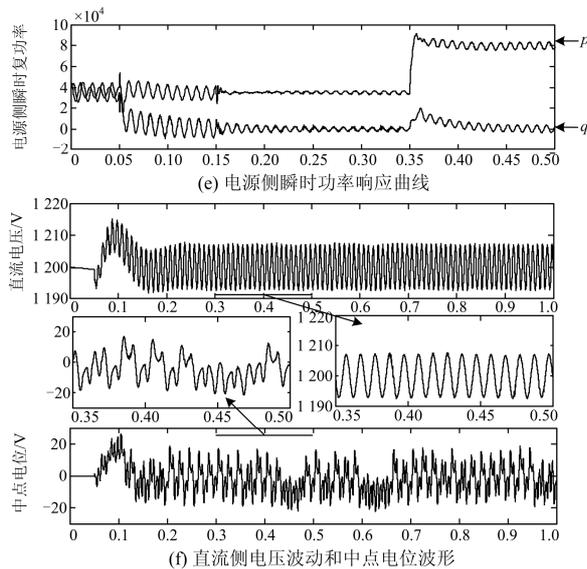


图5 三电平 DSTATCOM 在电压不对称时运行情况
Fig. 5 Operation of three-level D-STATCOM under unbalance condition

4 结论

(1) 针对传统预测直接功率控制策略只可补偿负荷无功功率的局限性, 提出根据 D-STATCOM 负序等效电路数学模型来构建负序功率预测模型的 D-DPC 算法, 控制装置补偿负荷所需负序电流, 进一步扩展了 D-STATCOM 的补偿功能。

(2) 通过将电网负序电压经控制算法映射到逆变器输出交流侧的方式, 一方面消除了电网负序电压对装置可能产生的过流威胁, 另一方面方便了负序功率预测模型 D-DPC 算法的推导。

(3) 功率给定值和反馈值都为恒定直流量, 传统的 PI 调节器就可达到无静差控制, 因而实现方便, 且输出电流谐波含有率较低, 满足并网要求。

(4) 最后对系统的动态响应快速性进行了验证, D-STATCOM 装置基本可以在两个周波内就可实现对无功和负序电流的跟踪补偿。

参考文献

- [1] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善配电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
YUAN Jiixin, CHEN Bochao, WAN Li, et al. The method to improve power quality of distribution system by distribution static compensator[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 81-84.
- [2] 丁思奇, 曼苏乐, 崔灿, 等. 静止同步补偿器在电弧炉治理中的应用仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 155-160.

- DING Siqi, MAN Sule, CUI Can, et al. Simulation of STATCOM for electric arc furnace governance[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(1): 155-160.
- [3] 赵方平, 杨勇, 阮毅, 等. 三相并网逆变器直接功率控制和直接功率预测控制的对比[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 212-220.
ZHAO Fangping, YANG Yong, RUAN Yi, et al. Comparative study for direct power control and direct power predictive control in three-phase grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 212-220.
- [4] 姚志垒, 肖岚. 基于改进 DPC-SVM 的三相并网逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 141-147.
YAO Zhilei, XIAO Lan. Three-phase grid-connected inverters with improved DPC-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 141-147.
- [5] 年珩, 程鹏. 电网电压不平衡时 PWM 整流器的谐振直接功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 86-94.
NIAN Heng, CHENG Peng. Resonant based direct power control strategy for PWM rectifier under unbalanced grid voltage condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 86-94.
- [6] AURTENCHEAS, RODRIGUEZ M, OYARBIDE E, et al. Predictive direct power control of MV grid-connected three-level NPC converters[C] // Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, Vigo, 2007.
- [7] AGUILERA R P, QUEVEDO D E, VAZQUEZ S, et al. Generalized predictive direct power control for AC/DC converters[C] // ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE, Melbourne, VIC, 2013.
- [8] BOUAFIA A, GAUBERT J P, KRIM F. Predictive direct power control of three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1): 228-236.
- [9] 周杨, 江道灼, 王玉芬. 基于虚拟磁链的静止同步补偿器直接功率控制策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 205-210.
ZHOU Yang, JIANG Daozhuo, WANG Yufen. Study on direct power control of static synchronous compensator based on virtual flux linkage[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 205-210.
- [10] 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 unbalance load

- based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.
- [11] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58.
YUAN Xufeng, CHENG Shijie, WEN Jinyu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 52-58.
- [12] 郭三明, 孙鹏荆, 敬树仁, 等. 基于预测模型的 STATCOM 功率控制策略建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 88-92.
GUO Sanming, SUN Pengjing, JING Shuren, et al. Research on modeling and simulation of power control method for STATCOM based on predictive model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 88-92.
- [13] 赵贺, 林海雪. 论电工领域中对 α - β 变换的误用[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 2997-3000.
ZHAO He, LIN Haixue. On misuse of α - β transformation in electrical engineering[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 2997-3000.
- [14] 文雷, 唐轶. 基于负序功率极性判定电压暂降源方位[J]. 电器与能效管理技术, 2016, 43(1): 55-61.
WEN Lei, TANG Yi. An approach of voltage sag source locating based on negative sequence power flow polarity[J]. Electrical and Energy Management Technology, 2016, 43(1): 55-61.
- [15] 陆原, 胡丙辉, 张军伟, 等. 基于 SVPWM 调制的三段式算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 68-75.
LU Yuan, HU Binghui, ZHANG Junwei, et al. A three-segment algorithm research based on SVPWM modulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 68-75.
- [16] 涂春鸣, 李慧, 唐杰, 等. 电网电压不对称对 D-STATCOM 的影响分析及抑制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 114-121.
TU Chunming, LI Hui, TANG Jie, et al. Analysis and suppression of influence on D-STATCOM under unbalanced voltage of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 114-121.
- [17] 李平, 武建文, 张之昊, 等. 基于双 DSP 结构的配电网静止同步补偿器设计[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 28-33.
LI Ping, WU Jianwen, ZHANG Zhihao, et al. Design of the distribution static synchronous compensator based on dual-DSP[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 28-33.

收稿日期: 2015-06-18; 修回日期: 2016-03-24

作者简介:

陈奎(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为供电系统安全与保护、电能质量等;

周东(1990-), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为无功补偿与谐波抑制。Email:zdxdcumt@163.com

(编辑 葛艳娜)