

# Research on Novel Direct Power Control Strategy of Three-Level STATCOM

Yiyan Zhang, Rui Gao, Yiming Xiao

Jiading Power Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electronic Power, Shanghai  
Email: [24650185@qq.com](mailto:24650185@qq.com)

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2015; accepted: Apr. 12<sup>th</sup>, 2015; published: Apr. 17<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The three-level STATCOM (static synchronous compensator) plays an important role in the reactive power compensation of the distribution system. In all of the control strategies of three-level STATCOM, traditional hysteresis direct power control (DPC) strategy has the characteristics of uncertain switching frequency which made the grid connected filter hard to design. In this paper, it presents a novel constant switching frequency direct power control strategy of three-level STATCOM. The novel strategy based on the mathematical model of three-level STATCOM, and three-level SVPWM strategy is used as modulation strategy. Using PI controller and instantaneous power feedforward and decoupling control, the novel strategy realizes constant switching frequency as while as good reactive compensation effect. Finally, the simulation verified the correctness and rationality of the proposed method.

## Keywords

Three-Level STATCOM, Constant Switching Frequency Direct Power Control Strategy, Mathematical Model, Three-Level SVPWM, Feedforward and Decoupling Control

---

# 三电平STATCOM新型直接功率控制策略研究

张一彦, 高 睿, 肖一鸣

国网上海市电力公司嘉定供电公司, 上海

Email: [24650185@qq.com](mailto:24650185@qq.com)

收稿日期: 2015年4月1日; 录用日期: 2015年4月12日; 发布日期: 2015年4月17日

## 摘要

三电平静止同步补偿器(STATCOM)在配电网无功补偿领域发挥重要的作用。在三电平STATCOM控制策略中,传统的滞环式直接功率控制策略具有开关频率不固定的缺陷,这为网侧滤波器的设计带来了困难。本文提出一种新型三电平STATCOM定频直接功率控制策略。该策略从三电平STATCOM数学模型出发,以三电平SVPWM策略作为调制策略,采用以PI控制器为核心的前馈解耦控制系统对瞬时功率进行控制,以直流总电压的平方项为外环控制目标,在实现系统开关频率固定的同时得到良好的无功补偿效果。最后通过仿真验证了本文提出方法的正确性和合理性。

## 关键词

三电平静止同步补偿器, 定频直接功率控制策略, 数学模型, 三电平SVPWM策略, 前馈解耦控制

## 1. 引言

冲击性、波动性负荷的投入使电网存在电压波动、闪变、三相不平衡等现象,同时也降低了电网的有功功率输送能力,这严重削弱和干扰了电网的安全可靠运行,因此迫切需要增设动态无功补偿装置。STATCOM装置以其在动态响应、输出谐波等方面的优势成为近年来的研究热点,其应用范围也越来越广泛。与传统的两电平STATCOM相比,三电平STATCOM具有更高的装置容量,更好的补偿效果和系统可靠性,因而具有良好的应用前景[1]-[3]。

在STATCOM的控制策略中,最常用的控制策略是电压定向控制(Voltage Oriented Control Strategy, VOC)策略。1983年, Akagi H.教授提出了著名的瞬时无功功率理论(pq理论) [4]-[6], 20世纪80年代中期, Takahashi I.教授和 Depenbrock M.教授分别提出了圆形直接转矩控制方案[7]和六边形直接转矩控制方案[8]。1991年, Ohnishi T.教授结合瞬时功率理论和直接转矩控制提出了直接功率控制(Direct Power Control Strategy, DPC)策略[9] [10]。传统DPC策略通过滞环控制选择合适的矢量对系统瞬时功率进行控制,与VOC策略相比,滞环式DPC策略具有算法简单、动态响应更好等优点[11] [12],但也存在开关频率不固定、网侧滤波器设计困难的不足,因而实际应用较少。

本文分析了三电平STATCOM DPC策略的基本原理,推导了其数学模型,提出了一种三电平定频DPC策略,该策略以直流电压的平方量为电压外环控制目标,以瞬时功率为功率内环控制目标,采用SVPWM策略作为调制策略,实现了系统的定频控制。并通过冗余矢量作用时间的实时计算解决了三电平STATCOM存在直流电容电压不平衡问题。最后,通过仿真对本文的理论分析进行了验证。

## 2. 三电平 STATCOM 数学模型

瞬时无功功率理论是直接功率控制策略的基础。设三相电路各相电压和电流的瞬时值分别为  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  和  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ , 经过坐标变换到 dq 同步旋转坐标系下得到电压  $u_d$ 、 $u_q$  和电流  $i_d$ 、 $i_q$ 。

瞬时无功功率理论定义如下式所示:

$$p = u_d i_d + u_q i_q, \quad q = u_q i_d - u_d i_q \quad (1)$$

如图 1 所示为三电平 STATCOM 等效电路图。每相桥臂可以简化为一个与直流侧电容相通的单刀三掷开关。在图 1 中,  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为三相电网电压, N 为其参考点;  $R_s$ 、 $L_s$  分别为线路等效电阻和网侧电感;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为三相电流;  $C_1$ 、 $C_2$  为直流电容(一般设定  $C_1 = C_2 = C$ ),  $u_{c1}$  和  $u_{c2}$  为两电容上电压,  $U_{dc}$  为直流侧总电压;  $i_p$ 、 $i_n$  和  $i_o$  分别为流入 p 点、n 点和 o 点的电流,  $i_{c1}$  和  $i_{c2}$  为流过直流电容的电流。

将图 1 中各量变换到两相同步旋转坐标系中, 可得整流器的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} L_s di_d/dt \\ L_s di_q/dt \\ C du_{c1}/dt \\ C du_{c2}/dt \\ L_L di_L/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega & -S_{dp} & S_{dn} & 0 \\ -\omega & -R_s & -S_{qp} & S_{qn} & 0 \\ S_{dp} & S_{qp} & 0 & 0 & -1 \\ -S_{dn} & -S_{qn} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{c1} \\ u_{c2} \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式中,  $u_d$ 、 $u_q$  及  $i_d$ 、 $i_q$  分别表示三相电压  $u_x$  和  $i_x$  ( $x = a, b, c$ ) 在同步旋转 dq 坐标系中的对应值,  $S_{dy}$  和  $S_{qy}$  分别为开关函数  $S_{xy}$  ( $x = a, b, c, y = p, n$ ) 在 d、q 轴上的对应值。

由式(1), 当 d 轴始终与参考电压矢量重合时,  $u_q = 0$ , 此时瞬时功率可表示为:

$$p = u_d i_d; \quad q = -u_d i_q \quad (3)$$

由式(2), 在 dq 轴上电感电压满足如下约束:

$$\begin{cases} \omega L_s di_d/d\theta = -R_s i_d + \omega L_s i_q - S_{dp} u_{c1} + S_{dn} u_{c2} + u_d \\ \omega L_s di_q/d\theta = -R_s i_q - \omega L_s i_d - S_{qp} u_{c1} + S_{qn} u_{c2} + u_q \end{cases} \quad (4)$$

上式中  $\omega$  为同步旋转坐标系的角速度,  $\theta$  为旋转坐标系转过的角度,  $\theta = \omega t$ 。将上式的左右两边同乘以  $u_d$ , 并结合(3)式有:

$$\begin{cases} \omega L_s dp/d\theta = -R_s p - \omega L_s q - u_d (S_{dp} u_{c1} - S_{dn} u_{c2}) + u_d^2 \\ \omega L_s dq/d\theta = -R_s q + \omega L_s p + u_d (S_{qp} u_{c1} - S_{qn} u_{c2}) \end{cases} \quad (5)$$

定义参考电压矢量在 x 轴上的投影  $u_{rx}$  如下:

$$u_{rx} = S_{xp} u_{c1} - S_{xn} u_{c2} \quad (x = d, q) \quad (6)$$

实际应用中一般忽略  $R_s$  项的影响, 在三相电压对称时( $U$  为相电压有效值), 则有:

$$\begin{cases} \omega L_s dp/d\theta = (3U^2 - \sqrt{3}U u_{rd} - \omega L_s q) \\ \omega L_s dq/d\theta = \omega L_s p + \sqrt{3}U u_{rq} \end{cases}, \quad u_d = \sqrt{3}U \quad (7)$$

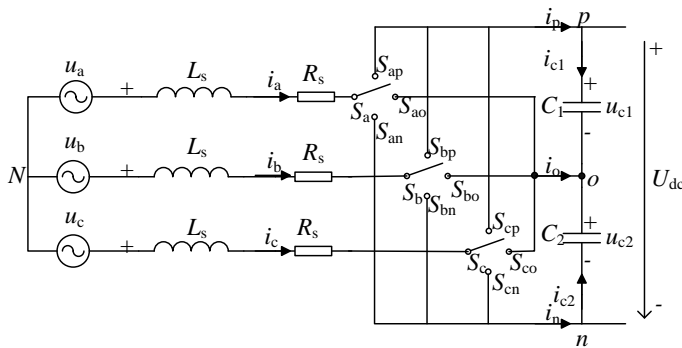


Figure 1. Equivalent circuit of three-level NPC rectifier  
图 1. 三相三电平 STATCOM 拓扑结构图

在式(7)的基础上可以进一步忽略耦合项, 则有:

$$\begin{cases} \omega L_s \frac{dp}{d\theta} = 3U^2 - \sqrt{3}Uu_{rd} \\ \omega L_s \frac{dq}{d\theta} = \sqrt{3}Uu_{rq} \end{cases} \quad (8)$$

以上得到的是基于瞬时无功功率理论的三电平 STATCOM 的数学模型。

### 3. 三电平 STATCOM 新型直接功率控制策略

在式(7)两端同除  $\sqrt{3}U$  有:

$$\begin{cases} \frac{\omega L_s}{\sqrt{3}U} \frac{dp}{d\theta} = \sqrt{3}U - u_{rd} - \frac{\omega L_s}{\sqrt{3}U} q \\ \frac{\omega L_s}{\sqrt{3}U} \frac{dq}{d\theta} = \frac{\omega L_s}{\sqrt{3}U} p + u_{rq} \end{cases} \quad (9)$$

令  $L = L_s / \sqrt{3}U$ , 考虑到  $u_d = \sqrt{3}U$  则有:

$$\begin{cases} L \frac{dp}{dt} = u_d - u_{rd} - Lq \\ L \frac{dq}{dt} = Lp + u_{rq} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10), 可以将功率内环采用 PI 控制器进行控制。本文提出一种新型三电平 STATCOM 定频直接功率控制策略, 其基本原理如图 2 所示。在如图 2 所示的三电平 STATCOM 定频直接功率控制策略中, 通过对直流电容电压的实时采样得到两直流电容电压差  $\Delta u_{dc}$  和直流总电压  $U_{dc}$ ,  $U_{dc}$  的平方和给定参考  $U_{dc}^2$  的误差经过 PI 控制器得到三电平 STATCOM 有功功率的参考量  $p^*$ , 无功功率的参考量  $q^*$  由系统实际所需无功功率决定。由实际采样得到的交流侧电压 ( $u_a, u_b, u_c$ ) 和电流 ( $i_a, i_b, i_c$ ) 可计算得系统到瞬时有功功率  $p$ 、瞬时无功功率  $q$  和网侧电压相位  $\theta$ 。系统给定有功功率  $p^*$ 、无功功率  $q^*$  与实际值之间的误差经 PI 控制器输出 dq 坐标系下参考电压  $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$ 。 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$ 、 $\theta$  及直流电容电压差  $\Delta u_{dc}$  即为三电平 STATCOM 调制策略的给定,  $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  和  $\theta$  可进行坐标变换得到两相静止坐标系下的参考电压  $u_{\square}$ 、 $u_{\square}$  或三相静止坐标系下的参考电压  $u_{ra}$ 、 $u_{rb}$  和  $u_{rc}$ 。由此, 本文提出的新型三电平 STATCOM 定频直接功率控制策略的内部调制策略可以为任意三电平调制策略, 本文中应用直流电压利用率较高的三电平 SVPWM 策略作为内部调制策略。由于三电平 SVPWM 策略目前已经十分成熟, 整个三电平 STATCOM 系统性能取决于电压外环控制器和功率内环控制器的设计。

## 4. 三电平 STATCOM 新型直接功率控制策略的控制器设计

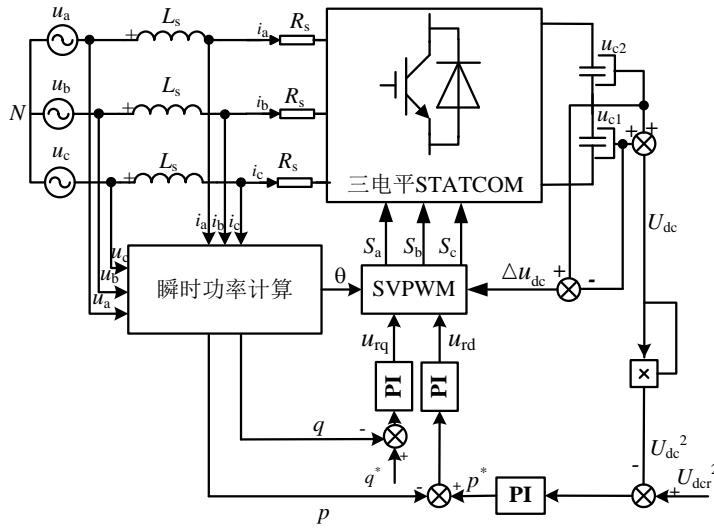
### 4.1. 功率内环控制器设计

由图 2 可知, 三电平 STATCOM 新型直接功率控制系统是由电压外环、功率内环组成的双闭环系统。功率内环控制器的设计直接关系到系统的性能, 以下给出三电平 STATCOM 新型直接功率控制系统功率内环的设计方法。

对式(10)进行拉普拉斯变换, 得:

$$\begin{cases} LsP(s) = U_d(s) - U_{rd}(s) - LQ(s) \\ LsQ(s) = LP(s) + U_{rq}(s) \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 由于  $L$  的存在, 系统中有功功率  $p$  和无功功率  $q$  相互耦合, 对系统控制造成影响。



**Figure 2. Fixed frequency DPC strategy of three-level STATCOM**  
**图 2. 三电平 STATCOM 定频直接功率控制策略原理图**

为了提高系统控制性能，本文采用前馈解耦控制策略[13]，系统的控制方程如下，其中， $K_p$ 、 $K_i$  分别为 PI 控制器的比例和积分增益：

$$\begin{cases} u_{rd} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(p^* - p) - Lq + u_d \\ u_{rq} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(q^* - q) - Lp \end{cases} \quad (12)$$

功率内环解耦控制框图如图 3 所示，根据该图及经典控制理论，即可设计三电平功率内环控制器。

#### 4.2. 三电平 STATCOM 电压外环控制器设计

外环控制器的设计是三电平直接功率控制系统与两电平电压电流双闭环系统的一个重要不同之处。在两电平电压双闭环系统中，直流电压作为电压外环给定，但在三电平直接功率控制系统中，外环的直流电压与内环的瞬时功率之间需借助瞬时有功电流(受直流电压影响)相对应。因此，若电压外环仍以直流电压为给定，将一定程度上降低系统的动态性能。为了得到较好的控制效果，需对三电平系统的电压外环重新设计。

考虑到功率内环的响应速度远远快于电压外环且可实现功率无差控制，在设计电压外环参数时，可将功率内环等效为一阶惯性系统，设传递函数为：

$$\omega_p(s) = \frac{1}{1 + T_p s} \quad (13)$$

上式中， $T_p$  为功率内环的响应时间。

在三电平 STATCOM 系统中，直流侧瞬时功率可以表示为：

$$P = U_{dc} \left( C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_L} \right) \quad (14)$$

忽略功率在器件上的损耗，假定两直流电容电压一致 ( $u_{c1} = u_{c2} = U_{dc}/2$ ) 且一个开关周期内平均中点电流为零，设  $R_L$  为直流侧等效电阻，则针对三相有功功率  $p$  有：

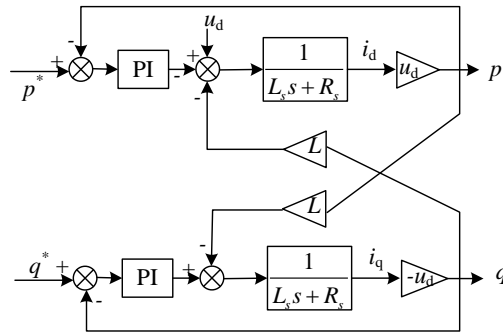


Figure 3. Power decoupling control of three-level STATCOM

图 3. 三电平 STATCOM 功率内环解耦控制框图

$$p = U_{dc} \left( \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_L} \right) = \left( \frac{1}{4} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} + \frac{U_{dc}^2}{R_L} \right) \quad (15)$$

根据式(15),  $U_{dc}$  与有功功率  $p$  的传递函数无法写出, 但是可以写出  $U_{dc}^2$  (令  $U = U_{dc}^2$ ) 与有功功率  $p$  的传递函数:

$$\frac{U(s)}{p(s)} = \frac{R_L}{\frac{1}{4} CR_L s + 1} \quad (16)$$

具体可以得到电压外环的控制框图如图 4 所示, 其中  $T_s$  为电压外环采样周期。

根据典型 II 型系统 PI 参数设计准则[13], 可以得到外环的 PI 参数如下(其中  $h$  为中频宽):

$$\begin{cases} K_p = \frac{C(h+1)}{8h(T_s + T_p)} \\ K_i = \frac{C(h+1)}{8h^2(T_s + T_p)^2} \end{cases} \quad (17)$$

### 4.3. 三电平 STATCOM 直流电容电压的均衡控制

三电平拓扑与传统两电平拓扑的区别在于存在两个直流电容, 这两个直流电容间的电压均衡问题是三电平拓扑控制中的一个关键问题。本文选择三电平 SVPWM 策略作为三电平 STATCOM 定频 DPC 系统的调制策略, 并采用冗余矢量作用时间实时计算的方法来补偿直流电容电压偏差。其基本原理如图 5 和表 1 所示, 在如图 5 所示的三电平 SVPWM 策略空间矢量图中, 将每个扇区划分为 6 个小区域。每个区域中采用一组对应相同位置的冗余矢量(表 1 中的  $S_1$  和  $S_4$ , 作用时间比为  $(1-k):k$ )来参与参考电压矢量的合成。通过各矢量的作用时间、交流侧电流值及直流电容电压的偏移情况, 可实时计算出使得一个开关周期内两直流电容电压平均值相等的  $k$  值, 通过实时计算  $k$  值即可达到平衡直流电容电压的目的。

## 5. 仿真验证

为了验证本文提出的三电平 STATCOM 新型直接功率控制策略的正确性, 搭建三电平 STATCOM 仿真平台对其进仿真验证。表 2 给出了仿真平台的关键参数。

如图 6 所示为补偿前电网电压和入网电流情况, 从该图可知, 当三电平 STATCOM 不工作时, 电网电压和入网电流之间存在一定的相位差, 因而有一定的无功功率注入电网。如图 7 所示为三电平

STATCOM 补偿后电网电压和入网电流情况，从该图可知，当三电平 STATCOM 投入后，入网电压和电流不存在相位差，三电平 STATCOM 补偿了阻感负载产生的无功。

如图 8 所示为三电平 STATCOM 工作时的直流电容电压情况，图 9 为三电平 STATCOM 输出功率情况，由这两个图可知，三电平 STATCOM 直流总电压超调很小且调节时间很短，这说明本文提出的三电平 STATCOM 直接功率控制策略具有较好的控制效果和动态性能；在直流电容电压的平衡控制方面，两直流电容电压被很好的控制在近似相等的范围内，在输出功率方面，除开始启动阶段三电平 STATCOM 从电网吸收一定的有功功率外，在稳态时三电平 STATCOM 基本不消耗有功功率。

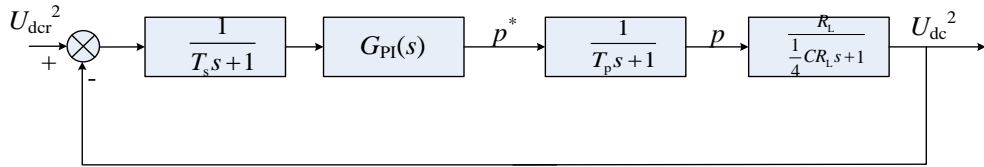


Figure 4. Voltage loop control of three-level STATCOM  
图 4. 三电平 STATCOM 系统电压外环控制框图

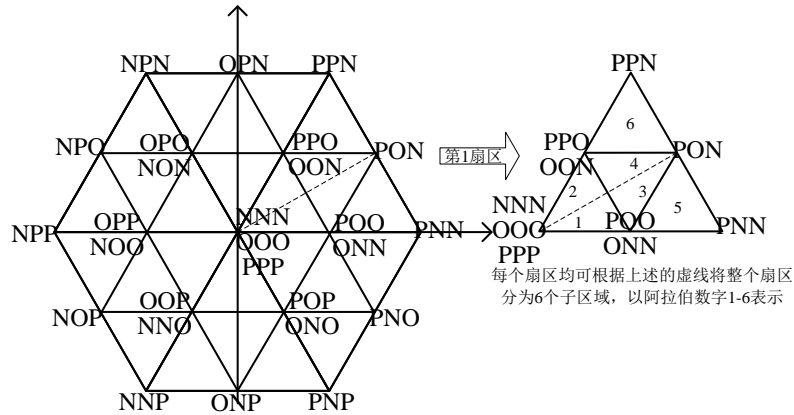


Figure 5. Space voltage vectors of three-level SVPWM  
图 5. 三电平 SVPWM 空间电压矢量分布图

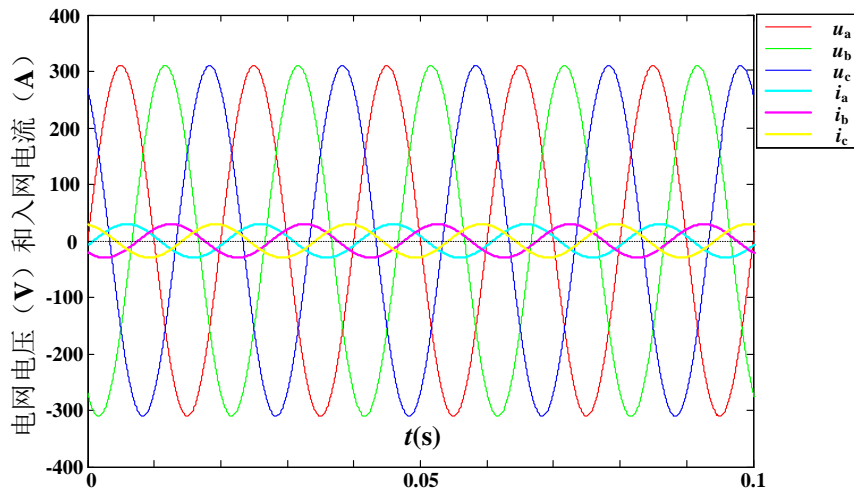


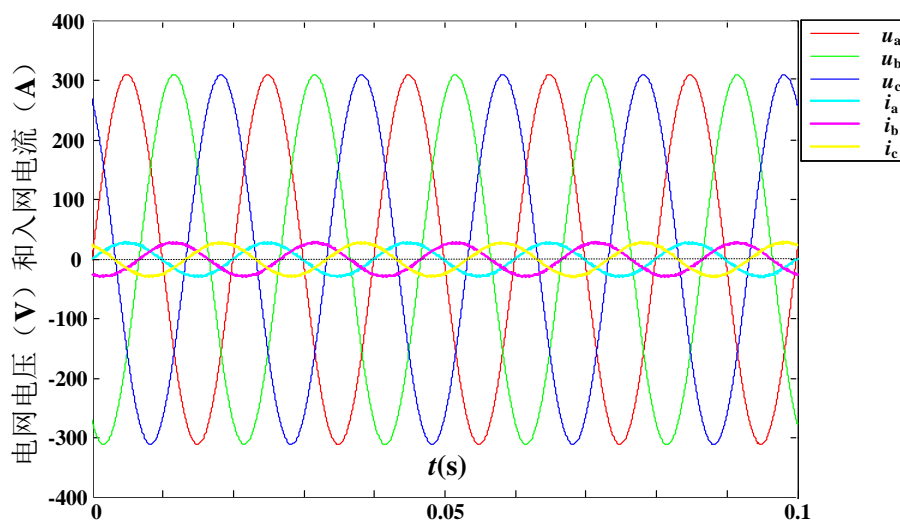
Figure 6. Grid voltage and current before compensation  
图 6. 补偿前电网电压和入网电流

**Table 1.** Real-time calculation results of redundant vector effect time (the first sector)  
**表 1.** 冗余矢量作用时间的实时计算结果(第一扇区)

子区域	开关状态及作用时间				k 值 $Q_{NPO} = -1/2(u_{c1} - u_{c2}) \times C$
	$S_1((1-k)T_a)$	$S_2(T_b)$	$S_3(T_c)$	$S_4(kT_a)$	
1	ONN	OON	OOO	POO	$(i_a T_a - i_c T_b - Q_{NPO}) / 2i_a T_a$
2	OON	OOO	POO	PPO	$(i_c T_a + i_a T_c - Q_{NPO}) / 2i_c T_a$
3	ONN	OON	PON	POO	$(i_a T_a - i_c T_b + i_b T_c - Q_{NPO}) / 2i_a T_a$
4	OON	PON	POO	PPO	$(i_c T_a - i_b T_b + i_a T_c - Q_{NPO}) / 2i_c T_a$
5	ONN	PNN	PON	POO	$(i_a T_a + i_b T_c - Q_{NPO}) / 2i_a T_a$
6	OON	PON	PPN	PPO	$(i_c T_a - i_b T_b - Q_{NPO}) / 2i_c T_a$

**Table 2.** Key parameters of the simulation platform  
**表 2.** 仿真平台关键参数

参数	参数值
交流侧相电压(有效值)	220 V
电网频率	50 Hz
三相负载	R = 10 Ω, L = 10 mH
STATCOM 交流电感	5 mH
STATCOM 直流电容	$C_1 = C_2 = 3000 \mu\text{F}$
STATCOM 直流电压	660 V
STATCOM 开关频率	4 kHz



**Figure 7.** Grid voltage and current after compensation  
**图 7.** 三电平 STATCOM 补偿后电网电压和入网电流



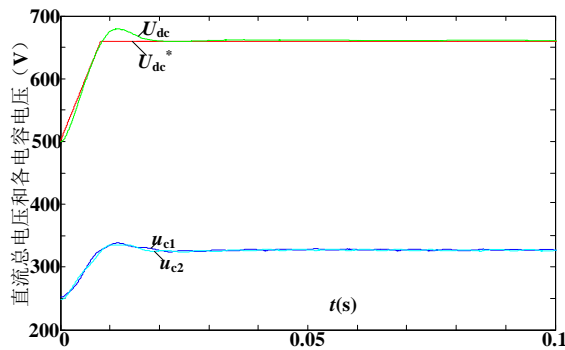


Figure 8. DC capacitor voltage of three-level STATCOM

图 8. 三电平 STATCOM 的直流电压情况

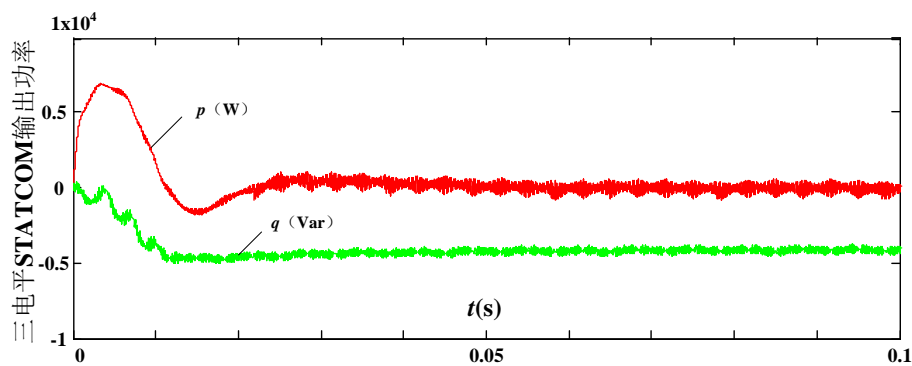


Figure 9. Output power of three-level STATCOM

图 9. 三电平 STATCOM 输出功率情况

## 6. 结论

三电平 STATCOM 是目前极具应用前景的一种动态无功补偿装置。而 DPC 策略作为一种性能优良的控制策略，具有算法简单、动态响应快的优点，已成为目前的研究热点。本文分析了传统三电平 STATCOM 滞环式直接功率控制策略的不足，在此基础上，提出了一种三电平 STATCOM 新型定频直接功率控制策略。新策略应用功率内环 PI 控制器实现了固定开关频率控制；应用有功、无功的解耦控制提高了系统的动态响应速度。仿真结果表明该算法的可行性。

## 参考文献 (References)

- [1] 张波 (2012) 基于 DSP 的 STATCOM 系统软件设计. 硕士论文, 西安电子科技大学, 西安.
- [2] 薛畅 (2009) 基于三电平拓扑结构的 STATCOM 的研究. 硕士论文, 哈尔滨工业大学, 哈尔滨.
- [3] 张鑫 (2013) 配电变一体化三电平静止无功补偿装置. 硕士论文, 华中科技大学, 武汉.
- [4] Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A. (1984) Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Application*, **20**, 625-630.
- [5] Peng, F.Z. and Lai, J.S. (1996) Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **45**, 293-297.
- [6] 刘进军, 王兆安 (1998) 瞬时无功功率与传统功率理论的统一数学描述及物理意义. *电工技术学*, **13**, 6-12.
- [7] Takahashi, I. and Noguchi, T. (1986) A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **22**, 820-827.
- [8] Depenbrock, M. (1988) Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **3**, 420-429.

- [9] Ohnishi, T. (1991) Three phase PWM converter/inverter by means of instantaneous active and reactive power control. *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Kobe, 28 October-1 November 1991, 819-824.
- [10] Noguchi, T., Tomiki, H., Kondo, S. and Takahashi, I. (1998) Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **34**, 473-479.
- [11] 杨达亮, 卢子广, 杭乃善, 李国进 (2011) 三相电压型PWM整流器准定频直接功率控制. *中国电机工程学报*, **31**, 66-73.
- [12] 李爽, 王志新, 王国强 (2013) 海上风电柔性直流输电变流器 P-DPC 控制研究. *电工技术学报*, **28**, 264-269.
- [13] 陈伯时 (2005) 电力拖动自动控制系统. 机械工业出版社, 北京.