

赵建阳 张福民 龚博 等.基于 D-STATCOM 的煤矿供电系统功率平衡控制方法[J].煤炭学报,2017,42(S1):288-294.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1665
Zhao Jianyang Zhang Fumin Gong Bo et al.Power balance control method based on D-STATCOM in coal mine power supply system[J]. Journal of China Coal Society 2017,42(S1):288-294.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1665

基于 D-STATCOM 的煤矿供电系统功率平衡控制方法

赵建阳^{1,2} 张福民² 龚博¹ 孙佳伟³

(1.中国能源建设集团天津电力设计院有限公司,天津 300400; 2.河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室,天津 300130; 3.国网河北省电力公司保定供电分公司,河北保定 071000)

摘要:为了解决煤矿供电系统三相不对称运行问题,提出了一种基于 D-STATCOM 瞬时功率平衡补偿的控制策略。给出了 D-STATCOM 系统接线图,分析了电网功率不对称对 D-STATCOM 控制特性的影响。提出了一种单相 $P-Q$ 功率解耦控制方法,实现电网有功功率和无功功率的独立控制。在此基础上提出了一种零序能量转换为有功功率补偿的机制,给出了一种三相功率平衡的控制方法。Matlab/Simulink 仿真结果表明,电网功率不对称运行时,D-STATCOM 不但能够独立控制无功功率,还可以平衡三相有功电流。

关键词:功率不对称; D-STATCOM; 单相 $P-Q$ 解耦; 零序电压注入; 三相功率平衡

中图分类号: TD61 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2017)S1-0288-07

Power balance control method based on D-STATCOM in coal mine power supply system

ZHAO Jian-yang^{1,2} ZHANG Fu-min² GONG Bo¹ SUN Jia-wei³

(1.Tianjin Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Group, Tianjin 300400, China; 2.Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3.State Grid Baoding Electric Power Supply Company, Baoding 071000, China)

Abstract: To solve the three-phase unbalanced operation of coal mine power supply system, a power balance control strategy of D-STATCOM was proposed. It proposed a D-STATCOM system connection diagram and analyzed the effects of power asymmetry on the D-STATCOM control characteristics. To realize the $P-Q$ independent control of active power and reactive power, it mentioned a single-phase power decoupling control method. Through zero sequence voltage injection, it advanced a kind of energy conversion mechanism between zero sequence and active power. Matlab/Simulink simulation results show that during the three-phase unbalanced operation of coal mine power supply system, not only can the D-STATCOM control the reactive power independently, but also balance the three-phase active current operation.

Key words: power asymmetry; D-STATCOM; single-phase $P-Q$ decouple; zero sequence voltage injection; three-phase power balance

随着煤矿开采技术的飞速发展,大型化、数字化装置在运行过程中,产生了大量的谐波,造成变压器、和智能化成为煤矿设备的发展趋势。同时,电力电子电机、电容器组和线路的损耗加剧;产生的负序电流

对电机等旋转机械产生附加转矩,降低工作效率,增加能耗;产生的无功冲击的作用,对电压造成严重的波动和闪变;产生的电网不对称运行工况,降低供电的可靠性,给煤矿安全生产带来严重的影响^[1-2]。

因此,对煤矿供电系统进行无功补偿和功率平衡控制变得十分必要。传统消除三相不对称的方法有:改进配电变压器结构、并联滤波器、改变不对称负载参数等,虽然取得了一些成果,但是没有从根本上解决三相不对称问题。

随着电力电子技术和瞬时无功功率控制理论的发展,配电网静止无功补偿器(D-STATCOM)可现提高电网电能质量、补偿电网无功功率,成为时下研究的热点,尤其是在三相功率不对称时的功率补偿特性^[3-5]。文献[6-9]提出了分序补偿不对称负载,在 D-STATCOM 输出电流中加入负序和零序电流来抑制配电网三相不对称,文献[10]在瞬时功率理论基础上提出经典 PI 控制的 STATCOM 通过无功功率补偿电网电压和电流的不对称,文献[11-13]提出分相瞬时电流控制策略补偿电网不对称,但是以上文献均通过无功功率补偿电网电压平衡,对有功功率补偿涉及较少。文献[14-15]配电网 STATCOM 在电网对称情况下采用 i_d-i_q 分解法补偿电网无功功率需求,在电网不对称时,加入零序电流补偿单元,保证电网对称运行,但是文中没有对零序电流补偿机理进行详细的阐述。文献[16-17]分析零序电压与补偿电流的相互作用,建立一种功率交换机制实现三相功率平衡,该控制策略未涉及单相有功功率和无功功率的独立控制。

本文首先分析电网三相不对称对 D-STATCOM 控制特性的影响,给出消除负序分量的方法。在单相锁相环 P-Q 解耦控制方法基础上,通过单相锁相环获得每一相单独的同步信号,实现单相有功功率和无功功率的解耦控制。针对电网三相不对称问题,提出了一种基于零序电压注入机理和换流器直流侧电容电压平衡控制技术,把电网不平衡工况时零序能量重新分配,实现三相电网功率平衡补偿。最后,仿真验证 D-STATCOM 在电网三相平衡和不平衡工况时,无功功率和有功功率的平衡的运行特性,以及直流侧电容电压平衡控制效果。

1 负序分量对 D-STATCOM 的影响

图 1 为 D-STATCOM 原理。电网电压通过 10 kV/400 V 配电变压器获得,变压器一次侧采用 Δ 接,二次侧采用 Y 接,二次侧中性点接地。D-STATCOM 拓扑是电压型换流器。 U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} 为电网三相

电压; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 为电网三相电流; Z_{La}, Z_{Lb}, Z_{Lc} 为 Y 接三相负载。 U_{ca}, U_{cb}, U_{cc} 为 D-STATCOM 输出三相电压; i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为 D-STATCOM 输出三相电流。以换流器直流侧储能电能的中点为参考点,电网变压器二次侧中性线、D-STATCOM 直流侧储能零电位参考点和 Y 接三线负载中线相连,中线流经电流函数 $i_N(t)$ 为 D-STATCOM 平衡三相功率提供有功支撑通路。

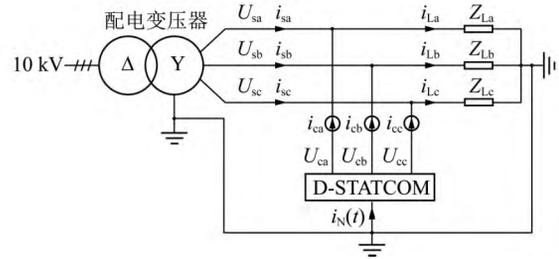


图 1 D-STATCOM 原理

Fig. 1 Configuration of D-STATCOM

设三相不对称电网电压为

$$\begin{cases} U_{sa} = U_p \cos(\omega t + \alpha) + U_N \cos(\omega t + \beta) \\ U_{sb} = U_p \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ) + U_N \cos(\omega t + \beta + 120^\circ) \\ U_{sc} = U_p \cos(\omega t + \alpha + 120^\circ) + U_N \cos(\omega t + \beta - 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

其中 U_p, U_N 分别为三相电网电压的正序和负序分量的幅值; α, β 为相应的相角。

当电网电压不对称时,由于 D-STATCOM 采用对称分量法控制,它的输出电流中也含有负序分量,所以 D-STATCOM 的输出电流可表示为

$$\begin{cases} i_{ca} = I_p \cos(\omega t + \gamma) + I_N \cos(\omega t + \delta) \\ i_{cb} = I_p \cos(\omega t + \gamma - 120^\circ) + I_N \cos(\omega t + \delta + 120^\circ) \\ i_{cc} = I_p \cos(\omega t + \gamma + 120^\circ) + I_N \cos(\omega t + \delta - 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

其中 I_p, I_N 分别为三相电网电流的正序和负序分量的幅值; γ, δ 为相应的相角。

将电网电压(U_{sa}, U_{sb}, U_{sc})和 D-STATCOM 的输出电流(i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})经 abc/ $\alpha\beta$ 转换,得到 D-STATCOM 公共连接点的视在功率表达式为

$$S = P + jQ = U_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta}^* = (U_p I_p e^{j(\alpha-\gamma)} + U_N I_N e^{-j(\beta-\delta)}) + (U_p I_N e^{j(2\omega t + \alpha + \delta)} + U_N I_p e^{-j(2\omega t + \beta - \gamma)}) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,当电网电压不对称时,电压和电流正、负序分量的交叉导致公共连接点的瞬时功率出现 2 倍频脉动的现象^[18-19]。而 D-STATCOM 交流侧的瞬时有功功率,和直流侧电容的充电功率相等,因此公共连接点瞬时有功功率的 2 倍频脉动会导致直流侧电容电压 2 倍频波动。

通常换流器相位设计采用三相锁相环 将电网三相电压信号经过 abc-dq 之间同步坐标系变换 ,转换成 dq 坐标上两直流分量电压^[20]。当 dq 旋转坐标的旋转速度和三相坐标系相同时 ,跟踪信号的频率和电网电压的频率达到一致。在电网负载不对称状况下 ,三相锁相环在旋转坐标转换后会产生 2 倍频谐波 ,导致三相相位跟踪波动 ,影响 D-STATCOM 输出电流的电能质量。为了实现三相电网功率平衡控制 ,本文采用了单相锁相环 ,使用带通滤波器消除谐波 ,单相锁相环如图 2 所示。

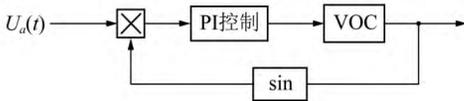


图 2 单相锁相环仿真

Fig. 2 Single PLL Simulink control block

2 D-STATCOM 功率平衡控制策略

2.1 P-Q 解耦控制

当单相锁相环保持与 a 相同步 ,电压 q 轴分量为 0 ,就可以实现 P-Q 解耦控制。下面以 a 相为例说明 a 相瞬时电压电流复数形式表达为

$$\begin{cases} U_a(t) = \text{Re} [U_a e^{j(\omega t + \varphi_{U-a})}] \\ i_a(t) = \text{Re} [I_a e^{j(\omega t + \varphi_{I-a})}] \end{cases} \quad (4)$$

瞬时值转化为复数

$$\begin{cases} \bar{U}_a = U_a e^{j\varphi_{U-a}} = U_{pa} + jU_{qa} \\ \bar{I}_a = I_a e^{j\varphi_{I-a}} = I_{pa} + jI_{qa} \end{cases} \quad (5)$$

其中 φ_{U-a} 、 φ_{I-a} 为电压和电流的相位; 下标 p、q 为正交分解的 2 个分量。当单相锁相环与电网电压同步时 ,可以得到电网电压瞬时值为

$$U_a(t) = U_{pa} \cos(\omega t) = \text{Re} [\bar{U}_a e^{j(\omega t)}] \quad (6)$$

因此电压复数形式只有实数部分 ,得到

$$\bar{U}_a = U_{pa} \quad (7)$$

由式(4)和式(5)得到

$$i_a(t) = I_{pa} \cos(\omega t) - I_{qa} \sin(\omega t) \quad (8)$$

a 相视在功率

$$\bar{S}_a = P_a + jQ_a = U_a I_{pa} - jU_a I_{qa} \quad (9)$$

因此 ,注入一个可控电流就可以实现 P-Q 功率解耦 ,注入函数为

$$R_a(t) = I_{pa}^* \cos(\omega t + \varphi_{I-a}) - I_{qa}^* \sin(\omega t + \varphi_{I-a}) \quad (10)$$

单相锁相环和 P-Q 解耦控制的控制原理如图 3 所示 ,其中 U_{a-ref} 为 a 相参考电压; P_a 为 a 相有功功率。

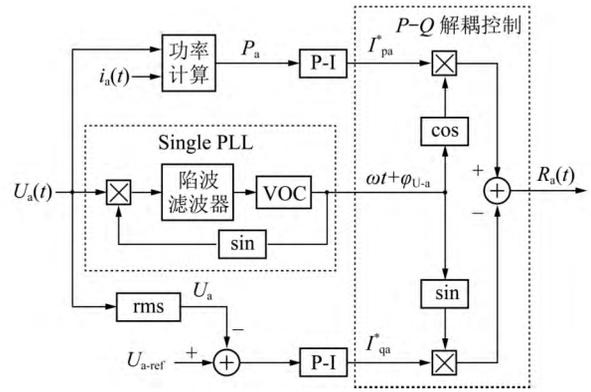


图 3 功率解耦控制

Fig. 3 Power decouple control block

2.2 补偿不对称有功功率与直流侧电压平衡控制

三相负载参数不一致会导致电网功率不对称现象。为了补偿不对称电流 ,要保持 D-STATCOM 直流侧上下电容电压恒定。电网不对称运行会产生三相有功功率的不平衡 ,直流侧参考中点会偏移。

假设流入 D-STATCOM 的有功功率增加 ,那么直流侧电容电压会增加 ,通过降低调制比来保持直流侧电容电压平衡。直流侧电容电压升高会产生较多的并联损耗 ,同时 ,零序电流的注入能量大于损耗 ,所以 ,必须把这部分能量转移到有功功率较低的相 ,转移能量的大小由三相平均有功功率决定。于是 ,D-STATCOM 在补偿无功功率的同时 ,适当独立调整各相的输出电流的幅值和相位 ,在保证直流侧上下电容电压保持恒定相等的基础上 ,把不对称运行产生的零序分量的能量通过 D-STATCOM 转化为有功功率 ,保证电网三相功率平衡^[21-24]。

功率平均分配计算模块设计如下 ,假设电网变压器二次侧有功功率分别为 P_a 、 P_b 和 P_c ,那么三相功率平衡工况下有

$$P_a = P_b = P_c = P_{ave} + \frac{P_{loss}}{3} \quad (11)$$

其中 P_{ave} 为三相平均功率; P_{loss} 为 D-STATCOM 每相功率损耗。

D-STATCOM 注入视在功率

$$\begin{cases} \bar{S}_{Ca}^* = P_{Ca}^* + jQ_{Ca}^* \\ \bar{S}_{Cb}^* = P_{Cb}^* + jQ_{Cb}^* \\ \bar{S}_{Cc}^* = P_{Cc}^* + jQ_{Cc}^* \end{cases} \quad (12)$$

D-STATCOM 注入有功功率必须满足

$$\begin{cases} P_{Ca}^* = P_{Sa} - P_{La} \\ P_{Cb}^* = P_{Sb} - P_{Lb} \\ P_{Cc}^* = P_{Sc} - P_{Lc} \end{cases} \quad (13)$$

负反馈误差 $\varepsilon P_a = P_{ave} + P_{loss} - P_a$, 从而满足式 (12), 当 $\varepsilon P_a = \varepsilon P_b = \varepsilon P_c = 0$ 时, 电网三相功率在 PCC 点实现三相功率平衡。

D-STATCOM 拓扑结构如图 4 所示。直流侧电容中点 M 与变压器底线和负载中线相连, 如图 1 所示。其中, 定义中点 M 为电压参考零点, 上部储能电容电压电流分别为 $U_U(t)$ 和 $i_U(t)$, 下部储能电容电压电流分别为 $U_L(t)$ 和 $i_L(t)$, 流过参考点电流 $i_N(t)$ L 为平波电抗器, 连接电网 PCC^[25-26]。

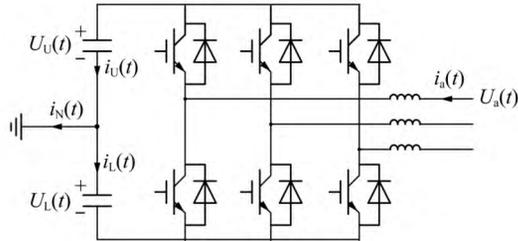


图 4 D-STATCOM 拓扑结构

Fig. 4 D-STATCOM topology configuration

当电网负载不对称 $i_U(t)$ 会产生零序电流, 零序电流影响储能电容电压不对称, 从而在换流器输出侧输出交流波形产生畸变。如果把直流侧电容中点作为参考点, 满足 $i_U(t) = -i_L(t) = 0.5i_N(t)$, 那么零序电流注入可以给 $U_U(t)$ 充电, 使得 $U_L(t)$ 放电。由基尔霍夫电流定律可以得到中点 M 的电流公式

$$i_N(t) = i_U(t) - i_L(t) \quad (14)$$

储能电容电压变化

$$\Delta U = U_U(t) - U_L(t) = \frac{1}{C} \int i_U(t) dt - \frac{1}{C} \int i_L(t) dt \quad (15)$$

式(14)代入式(15), 得到不对称电压为

$$\Delta U = \frac{1}{C} \int (i_U(t) - i_L(t)) dt = \frac{1}{C} \int i_N(t) dt \quad (16)$$

电网功率不对称的零序分量注入到 D-STATCOM 直流侧储能电容的中点, 从而实现功率的重新分配。

图 5 为 D-STATCOM 功率平衡控制整体框图, 它包括电网电压水平控制, 有功功率和无功功率平衡控制, 直流侧电容电压平衡控制, 以及注入视在功率的控制。功率平衡注入信号转换为 i_d 和 i_q 直流可控变量, 经过 i_d-i_q 到 abc 转换, 控制信号送入 D-STATCOM, 产生触发脉冲序列。

3 仿真验证

表 1 为电网系统和 D-STATCOM 功率平衡控制的仿真参数, 表 2 为负载参数。仿真工作主要包括, 验证 D-STATCOM 在电网对称情况下, 无功功率补偿

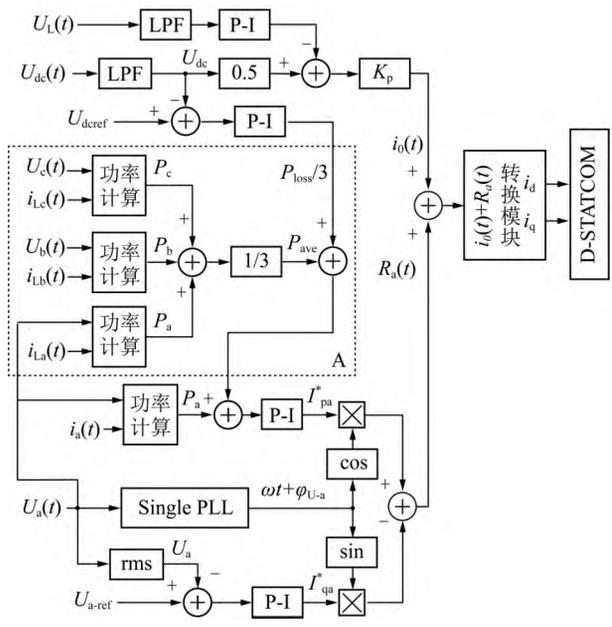


图 5 D-STATCOM 功率平衡单相控制示意

Fig. 5 D-STATCOM single phase power balance control

特性; 在电网不对称情况下, 2 倍频滤波效果, 直流侧电容变化及三相功率平衡补偿特性。

表 1 电网系统和 D-STATCOM 功率平衡控制参数

Table 1 Distribution networks and D-STATCOM power control simulation parameters

参数	数值
系统额定电压/V	400
额定容量/(kV·A)	250
系统频率/Hz	50
D-STATCOM 额定电流/A	50
D-STATCOM 直流侧上下电容参考电压/V	200
D-STATCOM 开关频率/kHz	2
D-STATCOM 直流侧电容/ μ F	1 000
D-STATCOM 的 i_d, i_q 比例积分参数	-0.5/-0.1
D-STATCOM 直流侧电压比例积分参数	-0.01/-0.003

表 2 负载仿真参数

Table 2 Load simulation parameters

运行状态	三相对称(a/b/c)	三相不对称(a/b/c)
工况 1(容性)	15.7+j(5×10 ⁻⁴)	30+j(5×10 ⁻⁴)
	15.7+j(5×10 ⁻⁴)	15+j(5×10 ⁻⁴)
	15.7+j(5×10 ⁻⁴)	10+j(5×10 ⁻⁴)
工况 2(感性)	10+j(2×10 ⁻⁴)	30+j(2×10 ⁻⁴)
	10+j(2×10 ⁻⁴)	15+j(2×10 ⁻⁴)
	10+j(2×10 ⁻⁴)	10+j(2×10 ⁻⁴)
工况 3(电阻)	15	30
	15	15
	15	10

3.1 电网对称工况无功补偿

首先针对电网对称运行工况下,负载参数变化见表2,仿真结果如图6所示。

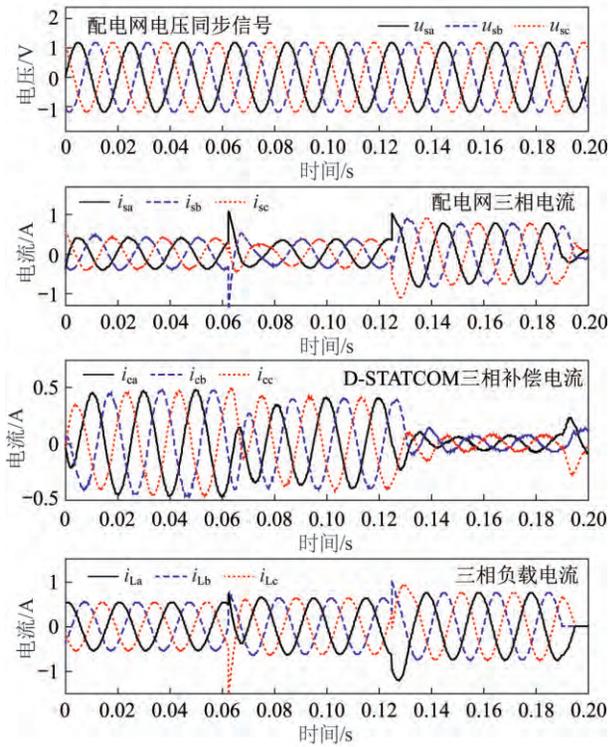


图6 对称运行时 D-STATCOM 无功补偿

Fig. 6 D-STATCOM reactive power compensation during three-phase balanced operation

在 0~0.06 s,负载为容性,电流超前电压,D-STATCOM 发出之后无功功率,电网二次电流经过感性补偿后,与电网电压信号基本同步。

在 0.06~0.12 s,负载为感性,电流滞后电压,D-STATCOM 发出之后无功功率,电网二次电流经过容性补偿后,与电网电压信号基本同步。

在 0.12~0.18 s,负载为阻性,负载电流与电网电压同步信号基本一致,D-STATCOM 发出之后无功功率补偿输电线路所需的无功功率。

3.2 电网不对称时 i_d 和 i_q 波形

电网不对称运行时,按照对称分量法可以把电网电压电流分解为正负零序。为了减小负序分量对控制策略的影响,文中采用单相锁相环,使用带通滤波器消除 2 倍频谐波,图 7 为 i_d 和 i_q 在电网不对称和经过滤波之后的仿真波形。由图 7 可知,不对称运行 i_q 产生 2 倍频波动,经过带通滤波器滤除谐波是,波动基本消除。

3.3 不对称时 D-STATCOM 直流侧上下电容电压

文中第 3 节给出了 D-STATCOM 直流侧上下电容电压平衡控制策略。为了得到趋近于正弦波的逆

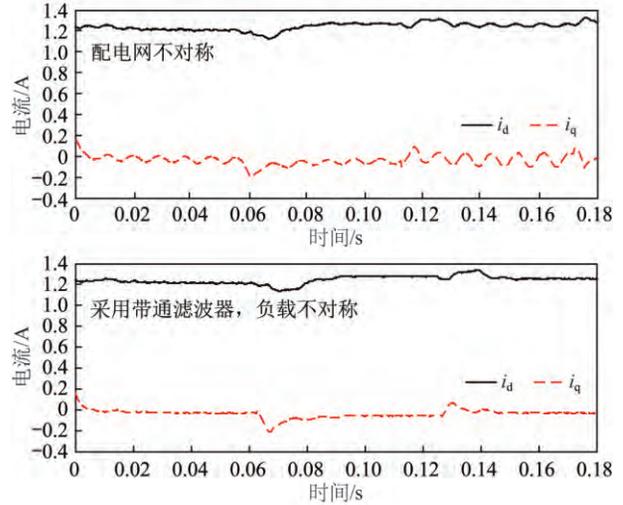


图7 不对称运行 i_d 和 i_q 波形

Fig. 7 Waveform of i_d and i_q during three-phase unbalanced operation

变电流,功率平衡控制策略中增加了电容电压平衡控制单元。

图 8(负载为容性时)为电网不对称运行时,有无电容电压平衡控制单元的对比仿真图。由图 8 可知,注入的零序分量,可以转化为实际的有功电流。

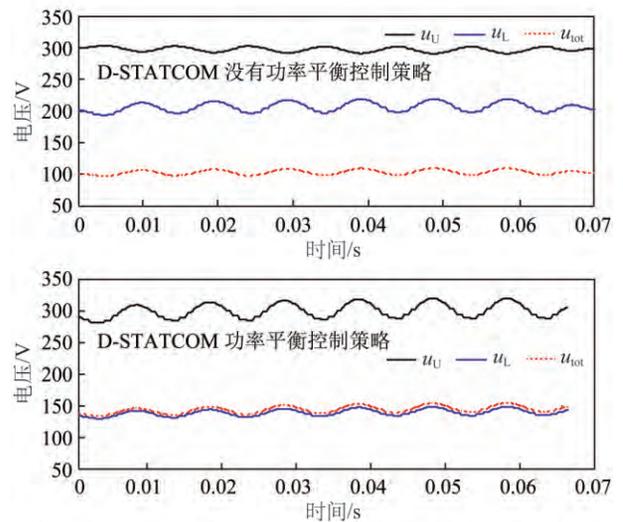


图8 D-STATCOM 直流侧电容电压波形

Fig. 8 D-STATCOM dc-side voltage waveforms

3.4 电网不对称时功率平衡控制

图 9 和图 10 为无、有功率平衡控制策略的仿真结果,负载参数见表 2。图 9 中,D-STATCOM 只进行无功补偿,在感性、容性和阻性工况下,电网三相电流幅值不相等。

图 10 中,D-STATCOM 不但进行无功补偿,而且在功率平衡控制策略下,也适当的进行有功功率补偿。在感性、容性和阻性工况下,电网三相电流幅值

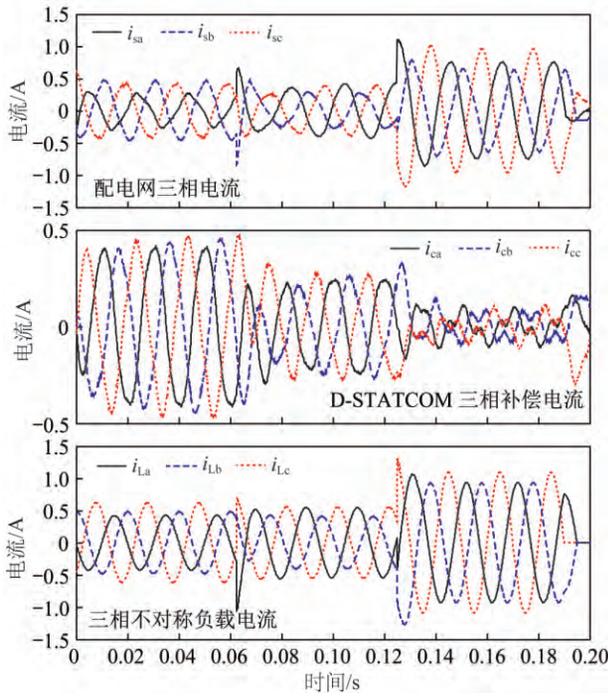


图 9 无功功率平衡控制时 D-STATCOM 功率补偿

Fig. 9 D-STATCOM power compensation without power balance control strategy

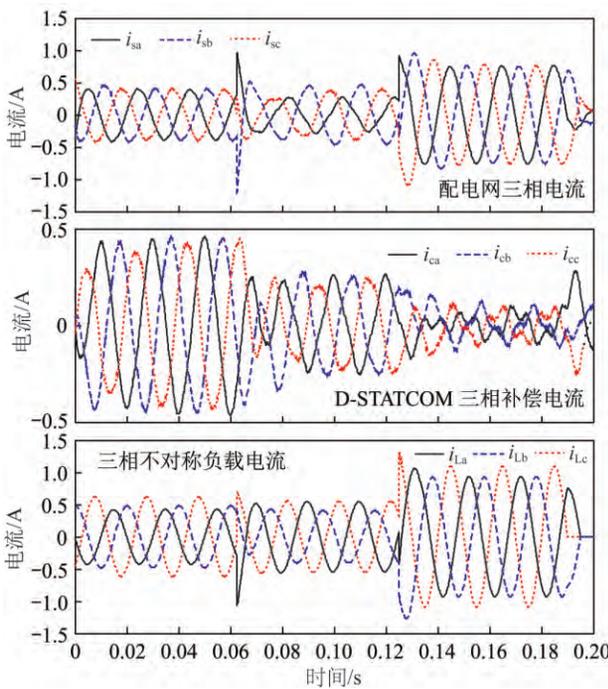


图 10 有功功率平衡控制时 D-STATCOM 功率补偿

Fig. 10 D-STATCOM power compensation with power balance control strategy

基本相等,零序分量产生的能量经过重新分配,以有功功率的形式补偿到电网中,得到有功功率和无功功率均平衡的电网。

4 结 论

运用对称分量法阐述了煤矿供电系统不对称运

行对 D-STATCOM 运行特性的影响。针对煤矿供电系统不对称运行,提出了 D-STATCOM 功率平衡控制策略。该控制策略采用单相独立控制,使用带通滤波器消除负序分量产生的 2 倍频;提出了一种零序能量转换的控制方法,在保证 D-STATCOM 直流侧电容电压平衡的基础上,把零序能量重新以有功功率形式重新分配到电网的每一相,达到功率平衡。仿真结果表明, D-STATCOM 不但可以补偿无功功率,也可以实现有功功率补偿,得到一个三相对称的电网络。

参考文献(References):

- [1] 吕康飞,石超越.三相电压不平衡情况下电机车整流技术的研究[J].工矿自动化,2012,38(2):49-52.
Lü Kangfei, Shi Chaoyue. Research of rectification technology of electric locomotive under unbalanced three-phase voltage [J]. Industry and Mine Automatic, 2012, 38(2): 49-52.
- [2] 朱景明,庞丹,王尧.基于瞬时对称分量法的三相四线制 D-STATCOM 控制研究[J].电测与仪表,2014,51(23):48-54.
Zhu Jingming, Pang Dan, Wang Yao. Three-phase four-wire D-STATCOM control based on instantaneous symmetrical component method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(23): 48-54.
- [3] Goswami A K, Gupta C P, Singh G K. Minimization of voltage sag induced financial losses in distribution systems using FACTS devices [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(3): 767-774.
- [4] Goswami A K. Minimization of voltage sag induced financial losses in distribution systems using a static VAR compensator [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 9(3): 256-276.
- [5] 许胜,杨振宇.一种基于电流分离补偿的级联型 DSTATCOM 及其建模与控制[J].电工技术学报,2012,27(9):25-33.
Xu Sheng, Yang Zhenyu. Modeling and control of cascaded H-bridge DSTATCOM based on current separation compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 25-33.
- [6] Czarnecki L S. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19: 828-836.
- [7] 李伟,吴凤江,段建东,等.储能型功率补偿系统的无功功率与动态有功功率解耦控制[J].高电压技术,2015,41(7):2165-2172.
Li Wei, Wu Fengjiang, Duan Jiandong et al. Decouple control strategy of dynamic active power and reactive power for storage energy-type power compensation system [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2165-2172.
- [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(21):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(21): 72-78.
- [9] Lee Tzung-Lin, Hu Shang-Hung, Chan Yu-Hung. D-Statcom with positive-sequence admittance and negative-sequence conductance to mitigate voltage fluctuations in high-level penetration

- of distributed-generation systems[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics 2013 60(4): 1417-1428.
- [10] 黄知超, 廖志剑, 黄祥莉.一种煤矿供电系统正负序分解方法研究[J].工矿自动化, 2015 41(11): 60-64.
Huang Zhichao, Liao Zhijian, Huang Xiangli. Research of a separation method of positive and negative sequence component in coal mine power supply system [J]. Industry and Mine Automatic, 2015 41(11): 60-64.
- [11] Xu Y, Tolbert L M, Kueck J D, et al. Voltage and current unbalance compensation using a static var compensator [J]. IET Power Electronics 2010 3(6): 977-988.
- [12] 孙毅超, 赵剑锋, 季振东, 等.基于 d-q 坐标系的单相链式 STATCOM 直流电压平衡控制策略 [J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2500-2506.
Sun Yichao, Zhao Jianfeng, Ji Zhendong, et al. A balance control strategy of DC-link voltages for single phase cascaded STATCOM based on d-q coordinates [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2500-2506.
- [13] 姜卫东, 吴志清, 余阳光, 等.电网不平衡时抑制有功功率二次波动的并网逆变器控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 106-111.
Jiang Weidong, Wu Zhiqing, She Yangyang, et al. Control strategy for suppressing active power secondary fluctuations of grid-connected inverter based on unbalanced grid [J]. Automation of Electric Power System 2014 38(15): 106-111.
- [14] João I Yutaka Ota, Yuji Shibano, Naoto Niimura, et al. A phase-shifted-PWM D-STATCOM using a modular multilevel cascade converter (SSBC) —Part I: Modeling, analysis, and design of current control [J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2015 51(1): 279-288.
- [15] João I Yutaka Ota, Yuji Shibano, Hirofumi Akagi. A Phase-Shifted-PWM D-STATCOM using a modular multilevel cascade converter (SSBC) —II: Zero-voltage-ride-through capability [J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2015 51(1): 289-296.
- [16] 刘钊, 刘银, 段善旭, 等.系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011 31(9): 1-7.
Liu Zhao, Liu Bangyin, Duan Shanxu, et al. Suppressing method of three-phase unbalanced overvoltage based on distribution networks flexible grounding control [J]. Proceedings of the CSEE, 2011 31(9): 1-7.
- [17] 胡应宏, 王建畴, 任佳佳, 等.基于直流侧能量的星接级联 STATCOM 零序电压注入控制方法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014 19(2): 78-84.
Hu Yinghong, Wang Jianze, Ren Jiajia, et al. Zero-sequence voltage injecting control of cascaded statcom based on DC side energy [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(2): 78-84.
- [18] Chang Weineng. Design and implementation of dstatcom for fast load compensation of unbalanced loads [J]. Journal of Marine Science and Technology 2009 17(4): 257-263.
- [19] 季振东, 孙毅超, 李东野, 等.星形和三角形连接的链式 H 桥 STATCOM 不平衡补偿分析 [J]. 高电压技术, 2015 41(7): 2435-2444.
Ji Zhendong, Sun Yichao, Li Dongye, et al. Comparative analysis for unbalance compensation of cascaded H-bridge STATCOMs between star and delta configuration [J]. High Voltage Engineering, 2015 41(7): 2435-2444.
- [20] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记.基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 43(2): 108-112.
Zhao Guilong, Cao Lingling, Zhu Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system [J]. Power System Protection and Control, 2015 43(2): 108-112.
- [21] Seyed Mahdi Fazeli, Hew Wooi Ping, Nasrudin Bin Abd Rahim, et al. Individual-phase control of 3-phase 4-wire voltage-source converter [J]. IET Power Electronics 2014 7(9): 2354-2364.
- [22] Hatano N, Ise T. Control scheme of cascaded H-bridge STATCOM using zero-sequence voltage and negative-sequence current [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2010 25(2): 543-550.
- [23] Blazic B. Improved D-STATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2006 21(1): 225-233.
- [24] 赵国鹏, 韩民晓, 刘进军.基于间接电流控制方法下系统稳定性的静止无功发生器参数设计 [J]. 电工技术学报, 2012 27(9): 17-24.
Zhao Guopeng, Han Minxiao, Liu Jinjun. Design of parameters in static synchronous compensator with indirect current control based on the system stability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2012 27(9): 17-24.
- [25] 周念成, 金明, 王强钢, 等.串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013 37(12): 13-18.
Zhou Niancheng, Jin Ming, Wang Qianggang, et al. Hierarchical coordination control strategy for multi-microgrid system with series and parallel structure [J]. Automation of Electric Power System, 2013 37(12): 13-18.
- [26] Jafri K, 陈柏超, 陈耀军, 等.基于 SVG 的 10 kV 15 电平 M-STATCOM 的建模仿真及控制策略研究 [J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1246-1251.
Jafri K, Chen Baichao, Chen Yaojun, et al. Modeling, simulation and control strategy of a novel 10 kV 15-level M-STATCOM under SVG condition [J]. High Voltage Engineering 2013 39(5): 1246-1251.