

不平衡工况下级联 STATCOM 分时段补偿控制

李圣清¹, 徐文祥^{1,2}, 乘伟周¹, 曾欢悦¹

(1.湖南工业大学, 湖南 株洲 412007; 2.合肥华威自动化有限公司, 安徽 合肥 231131)

摘要:针对不平衡工况下级联静止同步补偿器(STATCOM)的控制问题,分析了级联 STATCOM 在不平衡工况下的工作特性,推导了正负序环境下的系统解耦控制方程,提出一种新的正负序解耦脉宽调制(PWM)控制方法,分析了该方法下无功补偿和电压控制两种工作模式,并提出分时段补偿的控制方法。仿真和实验表明,利用分时段补偿控制可有效解决级联 STATCOM 在不平衡工况下的安全运行问题,实现其最大化利用。

关键词:静止同步补偿器;不平衡工况;脉宽调制;分时段补偿

中图分类号:TN715

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2015)02-0081-03

Sub-time Compensation Control of Cascade STATCOM in Unbalanced Condition

LI Sheng-qing¹, XU Wen-xiang^{1,2}, LI Wei-zhou¹, ZENG Huan-yue¹

(1.Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the control problem of cascade static synchronous compensator(STATCOM) in unbalanced condition, the operating characteristics of cascade STATCOM in unbalanced conditions is analyzed, decoupled control equation of the system is derived in the positive and negative sequence environments, a new control method of positive negative decoupling pulse width modulation(PWM) is put forward, the two kinds of work mode within the method are analyzed which are the compensation of reactive power and voltage control. Sub-time compensation control method is proposed. Simulation and experiment show that, compensation for the use of sub-time control method can effectively solve the problem of cascade STATCOM safe operation in unbalanced conditions and achieve the maximum utilization.

Keywords: static synchronous compensator; unbalance condition; pulse width modulation; sub-time compensation

Foundation Project: Supported by National Natural Science Foundation of China(No.51077046); The Construct Program of the Key Discipline in Hunan Province(No.201176)

1 引言

STATCOM^[1]具有可模块化、无需变压器等优点,因而得到广泛关注。同时它拥有分相调节能力和可变调制比,使其在无功补偿的同时兼具调节系统电压不平衡的潜力^[2]。目前,级联 STATCOM 大多数控制策略均工作在平衡工况下,很少有文献研究不平衡工况下的控制。文献[3-6]提出一些不平衡工况下的控制方法,但均存在不足。

这里针对不平衡工况下级联 STATCOM 的控制,通过分析其在不平衡工况下的工作特性,提出正负序解耦 PWM 控制,讨论其两种工作模式,基于此提出分时段补偿控制方法,使级联 STATCOM 在不平衡工况下,能快速有效、安全地发挥最大作用,并通过仿真和实验证明了其可行性和有效性。

2 不平衡工况下级联 STATCOM 特性

级联 STATCOM 的安全运行一共受两个因素影响:①装置输出的电流;②直流侧电容电压。输出电流在装置安全运行时有严格的上限 I_{max} ,为防止装置过流,必须满足 $I < I_{max}$ 。直流侧电容电压在装置运行时也有严格的上限 U_{Cmax} 和下限 U_{Cmin} ,装置安全运行必须满足 $U_{Cmin} < U_c < U_{Cmax}$ 。

所以在不平衡系统中,为保证级联 STATCOM 装置正常运行,必须满足上述两个条件。图 1 为级联 STATCOM 仅输出正序分量 u_{o+} 时的示意图。

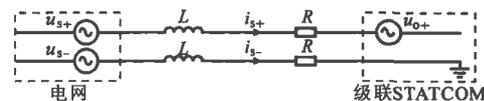


图 1 仅输出正序分量时的示意图

Fig. 1 Scheme of only output positive sequence component

当负序电流流过级联 STATCOM 时,若不加任何措施,其直流侧电容电压将产生二倍工频波动,即 U_c 由直流分量和 2 倍频交流电压叠加而成:

$$U_c = U_{dc} + U_{2\omega} \sin(2\omega t + \varphi) \quad (1)$$

此波动使直流侧电容电压难以满足 $U_{Cmin} < U_c <$

基金项目:国家自然科学基金(51077046);湖南省重点建设学科项目(201176)

定稿日期:2014-04-04

作者简介:李圣清(1961-),男,湖南永州人,博士,教授,研究方向为系统谐波分析与治理、电能质量调节与控制。

U_{Gmax} 而无法安全运行,各模块有功功率不可控,容易造成控制系统振荡。

当电网三相电压不平衡时,级联 STATCOM 对电网负序电压 u_{s-} 相当于短路,只有装置和电网间的连接阻抗发挥一定的限流功能,此时,即便系统电压不平衡度很小也会在装置中产生很大的负序电流 i_{s-} ,使其难以满足 $I < I_{\text{max}}$ 而造成装置过流。

图 2 为级联 STATCOM 同时输出正序与负序分量时的示意图。如果采取合适的控制方法,让级联 STATCOM 装置输出的负序电压 u_{o-} 与 u_{s-} 大小相同、方向相反,两者相互抵消,从而起到稳定接入点电压平衡的作用。

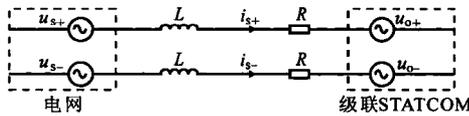


图 2 同时输出正序与负序分量时的示意图

Fig. 2 Scheme of output positive and negative sequence component

3 不平衡工况下级联 STATCOM 控制方法

3.1 正负序解耦 PWM 控制

由级联 STATCOM 在不平衡工况下的特性分析可知,需使其发出与 u_{s-} 大小相同的负序电压,以维持接入点电压平衡。因此,对传统有功-无功解耦 PWM 进行改进,提出正序-负序解耦 PWM 控制方法,具体分析如下:

系统电压平衡时,其负序含量为零,正序环境下解耦控制方程可参照电网电压平衡时的有功-无功解耦 PWM 控制。故正序解耦 PWM 方程为:

$$u_{\text{cd}+}^* = i_{\text{d}+}^* R - i_{\text{q}+}^* \omega L + u_{\text{cd}+}, \quad u_{\text{cq}+}^* = i_{\text{q}+}^* R + i_{\text{d}+}^* \omega L + u_{\text{cq}+} \quad (2)$$

式中: $u_{\text{cd}+}^*, u_{\text{cq}+}^*$ 分别为输出侧指令电压有功、无功正序分量; $u_{\text{cd}+}, u_{\text{cq}+}$ 分别为网侧电压有功、无功正序分量; $i_{\text{d}+}^*, i_{\text{q}+}^*$ 分别为输出侧指令电流有功、无功正序分量。

负序环境下,装置输出有功、无功功率分别为:

$$P_{0-} = 3(u_{\text{cd}-}^* i_{\text{d}-}^* + u_{\text{cq}-}^* i_{\text{q}-}^*) / 2, \quad Q_{0-} = 3(u_{\text{cq}-}^* i_{\text{d}-}^* - u_{\text{cd}-}^* i_{\text{q}-}^*) / 2 \quad (3)$$

式中: $u_{\text{cd}-}^*, u_{\text{cq}-}^*$ 分别为输出侧指令电压有功、无功负序分量; $i_{\text{d}-}^*, i_{\text{q}-}^*$ 分别为输出侧指令电流有功、无功负序分量。

装置接入电网处的有功、无功功率为:

$$P_- = 3(u_{\text{sd}-} i_{\text{d}-}^* + u_{\text{sq}-} i_{\text{q}-}^*) / 2, \quad Q_- = 3(u_{\text{sq}-} i_{\text{d}-}^* - u_{\text{sd}-} i_{\text{q}-}^*) / 2 \quad (4)$$

式中: $u_{\text{sd}-}, u_{\text{sq}-}$ 分别为网侧电压有功、无功负序分量。

连接阻抗吸收的有功、无功功率分别为:

$$P_{1-} = 3(i_{\text{d}-}^2 + i_{\text{q}-}^2) R / 2, \quad Q_{1-} = -3(i_{\text{d}-}^2 + i_{\text{q}-}^2) \omega L / 2 \quad (5)$$

由能量平衡原理可知:

$$P_{0-} = P_- + P_{1-}, \quad Q_{0-} = Q_- + Q_{1-} \quad (6)$$

结合式(3)~(6)可知,负序解耦 PWM 方程为:

$$u_{\text{cd}-}^* = i_{\text{d}-}^* R + i_{\text{q}-}^* \omega L + u_{\text{cd}-}, \quad u_{\text{cq}-}^* = i_{\text{q}-}^* R - i_{\text{d}-}^* \omega L + u_{\text{cq}-} \quad (7)$$

由式(2),(7)可知,正负序解耦 PWM 方程为:

$$\begin{cases} u_{\text{cd}}^* = u_{\text{cd}+}^* + u_{\text{cd}-}^* = (i_{\text{d}+}^* + i_{\text{d}-}^*) R + (i_{\text{q}-}^* - i_{\text{q}+}^*) \omega L + u_{\text{sd}} \\ u_{\text{cq}}^* = u_{\text{cq}+}^* + u_{\text{cq}-}^* = (i_{\text{q}+}^* + i_{\text{q}-}^*) R + (i_{\text{d}+}^* - i_{\text{d}-}^*) \omega L + u_{\text{sq}} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,系统正负序解耦 PWM 控制原理如图 3 所示。图中,三相静止坐标系到两相正序、负序旋转坐标系的传输矩阵分别为:

$$\begin{cases} T_{\text{abc/dq}+} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \\ T_{\text{abc/dq}-} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

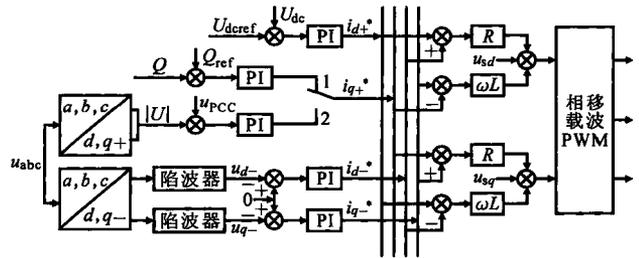


图 3 正负序解耦 PWM 控制原理

Fig. 3 Principle of positive and negative decoupling PWM control

直流侧电容电压给定值 U_{dcref} 与实际值 U_{dc} 经比较,通过 PI 调节后,得到正序有功指令电流 $i_{\text{d}+}^*$ 。 u_{abc} 通过 $T_{\text{abc/dq}+}$ 坐标变换后,经陷波器滤波后,得到负序有功电压 $u_{\text{d}-}$ 与负序无功电压 $u_{\text{q}-}$ 。当系统电压不平衡时,负序电压 $u_{\text{abc}} \neq 0$,则 $u_{\text{d}-} \neq 0$ 。控制目标是希望级联 STATCOM 发出与系统电压负序分量大小相等、方向相反的负序指令电压,使接入点电压负序分量为零,从而维持接入点电压平衡,即需 $u_{\text{abc}} = 0$,则只要 $u_{\text{d}-} = 0$ 即可。所以利用 $u_{\text{d}-}, u_{\text{q}-}$ 与零作差值,通过 PI 调节后,得到负序有功、无功指令电流 $i_{\text{d}-}^*, i_{\text{q}-}^*$ 。

图 3 中开关位于 1 位置,即正序无功指令电流 $i_{\text{q}+}^*$ 是通过瞬时无功检测到的无功功率 Q 与其给定值 Q_{ref} 比较经 PI 调节后得到,称级联 STATCOM 工作在无功补偿模式,以动态补偿系统无功为主。

图 3 中开关位于 2 位置时,即 u_{abc} 经 $T_{\text{abc/dq}+}$ 坐标变换后,通过幅值运算得到正序电压实际值,其与电网电压给定值 u_{PCC} 比较,经 PI 后得到 $i_{\text{q}+}^*$,称级联 STATCOM 工作在电压控制模式,以稳定接入点电压平衡为主。

3.2 级联 STATCOM 分时段补偿控制

系统电压不平衡度 ε 是衡量不平衡大小的性能指标,在无零序分量的三相系统中,当已知三相线电压 $u_{\text{ab}}, u_{\text{bc}}, u_{\text{ca}}$ 时,其不平衡度计算表达式为:

$$\varepsilon = \sqrt{(1 - \sqrt{3 - 6L}) / (1 + \sqrt{3 - 6L})} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $L = (u_{\text{ab}}^4 + u_{\text{bc}}^4 + u_{\text{ca}}^4) / (u_{\text{ab}}^2 + u_{\text{bc}}^2 + u_{\text{ca}}^2)^2$ 。

针对不同 ε 下级联 STATCOM 安全稳定运行,为实现级联 STATCOM 的最大程度利用,提出级联 STATCOM 分时段控制,通过实时采集电网数据信息,判断三相不平衡度大小。当 ε 达到国家标准($\varepsilon < 2\%$)时,希望级联 STATCOM 能正常发挥无功补偿功能,采用正序-负序解耦 PWM 的控制方法,让其工作在无功补偿模式;当 ε 在 $2\% \sim 20\%$ 时,希望级联 STATCOM 能控制系统电压使其平衡,采用正序-负序解耦 PWM 的控制方法,让其工作在电压控制模式;当 $\varepsilon > 20\%$ 时,通常情况下,因为其不平衡度过大,普通控制策略已无法达到良好的补偿效果,故选择让级联 STATCOM 封锁脉冲退出运行,等待系统恢复以后再投入使用。图 4 为控制流程图。

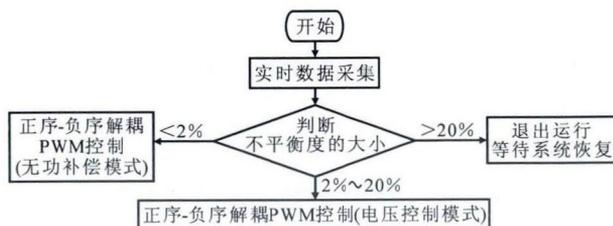


图 4 控制流程图

Fig. 4 Control flowchart

4 仿真与实验

基于 Matlab 7.0 进行仿真,系统电压 $u_s=220\text{ V}$,电网频率 $f_s=50\text{ Hz}$,连接电感 $L=5.1\text{ mH}$,直流侧电容 $C=2\ 200\ \mu\text{F}$, $U_{\text{dref}}=200\text{ V}$,图 5 为仿真波形。

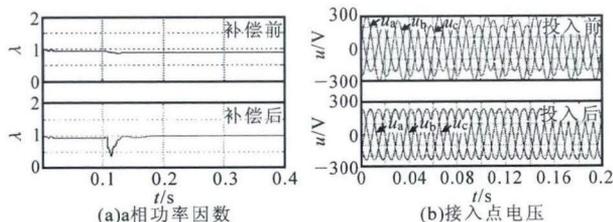


图 5 仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms

针对 $\varepsilon < 2\%$ 时处于无功补偿模式的正序-负序解耦 PWM 控制特性,进行仿真:0.1 s 时投入无功负载,图 5a 为 a 相电路功率因数。可见,a 相功率因数补偿前为 0.85,补偿后基本稳定在 1 左右,工作在无功补偿模式的正负序解耦 PWM 控制可有效实现动态补偿系统的无功功率。

针对 ε 介于 $2\% \sim 20\%$ 时处于电压控制模式的正序-负序解耦 PWM 控制特性,进行仿真:调节不平衡阻性负载后,使系统电压 ε 达 12.5%,图 5b 为投入级联 STATCOM 装置前、后接入点电压,可见,投入前,三相电压出现明显不平衡;投入后,三相电压基本趋于一致,波形质量较好,不平衡度降至

0.56%;工作在电压控制模式的正负序解耦 PWM 控制方法可有效解决接入点电压不平衡的问题。

实验负载为带阻感负载的三相整流桥。图 6 为级联 STATCOM 投入前、后接入点电压、电流。由图 6a 可见,投入前,系统三相电压为 351 V,420 V,387 V,不平衡度达 8.85%;投入后,系统三相电压为 397.2 V,398.8 V,396.5 V,不平衡度降至 0.45%。可见,补偿后,公共耦合点电压不平衡度明显降低,达到很好的补偿效果,该方法可有效补偿接入点电压不平衡。由图 6b 可见,投入级联 STATCOM 后,不平衡度明显降低,验证了该方法的有效性。

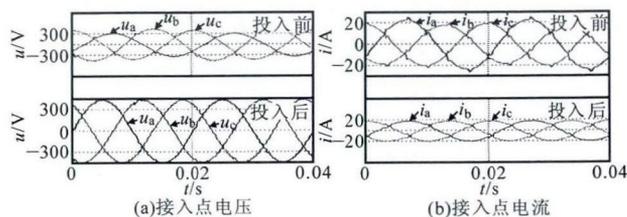


图 6 实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms

5 结论

通过分析级联 STATCOM 在系统电压不平衡工况下的工作特性,提出正负序解耦脉宽调制控制方法来解决级联 STATCOM 在不平衡工况下的安全稳定运行问题,并探讨了该方法下的两种工作模式。针对不平衡度的 3 个取值范围,提出分时段补偿的控制方法,实现了级联 STATCOM 的资源最大化利用。仿真和实验结果表明,所提控制方法能有效解决不同平衡度情况下级联 STATCOM 的正常运行问题,具有很高的工程实用价值。

参考文献

- [1] 罗承廉,纪勇,刘遵义.静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实践[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 耿俊成,刘文华,俞旭峰,等.链式 STATCOM 的数学模型[J].中国电机工程学报,2003,23(6):66-70.
- [3] 罗安,欧剑波,唐杰,等.补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J].中国电机工程学报,2009,29(6):55-60.
- [4] Song Q, Liu W H. Control of a Cascade STATCOM With Star Configuration Under Unbalanced Conditions[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, 24(1): 45-58.
- [5] Clark Hochgraf, Robert H Lasseter. STATCOM Controls for Operation With Unbalanced Voltages[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(2): 538-544.
- [6] 李旷,刘进军,魏标,等.静止无功发生器补偿配电网电压不平衡的控制及其优化方法[J].中国电机工程学报,2006,26(5):58-63.