

配电网无功补偿中的平均功率平衡控制

针对配电网的无功补偿问题,选取级联H桥型静止同步补偿器(STATCOM)的星形主电路为研究对象,提出了一种通过直流侧电压分层控制来实现系统平均功率平衡控制的方法。为此,建立了级联H桥型STATCOM的数学模型并分析了系统的功率交换过程。结果表明,只要对系统相电压和相电流的正序、负序分量进行合理控制,即可实现该型STATCOM的直流侧电压平衡和无功动态补偿。所提方法基于这一认识而提出,该方法以平均有功功率和平均无功功率为控制量,控制产生系统的参考补偿电流,并将其正序、负序分量与实际补偿电流的对应分量比较后得到调制信号。仿真分析表明,该方法在直流侧电压的平衡控制和系统的无功动态跟踪方面都具有良好的效果。

刘震宇/国网冀北电力有限公司承德供电公司
鲁修学 李 华/河北工业大学电气工程学院

当今,人们对电能质量的要求越来越高。然而各种非线性、冲击性感性负载在电力系统中的大量使用,导致系统中的无功功率猛增,一系列电能质量问题也随之产生,旨在解决此类问题的无功补偿技术日益受到重视并被工程实践迫切需求。级联H桥型静止同步补偿器^[1-2]

(STATCOM)是一种随柔性交流输电技术、电力电子技术不断发展而出现的新型无功补偿装置,具有电路结构灵活、所需器件较少、便于模块化设计和维修以及能实现的电平数最高等优点,是现阶段无功补偿领域研究的热点。运行经验表明,级联H桥型STATCOM系统能否满足控制要求的关键在于其控制方法的设计,很多文献均对其控制方法进行了讨论,出现了不少具有理论和实际价值

的研究成果。

文献[3]研究了直流侧电压的平衡控制方法,但未讨论无功电流动态控制问题;文献[4]讨论了电流内环、电压外环的双闭环电流直接控制方法;文献[5-6]提出了基于PI控制的前馈解耦控制方法,即利用PI控制近似代替系统的耦合数学模型,该方法控制思路清晰,但实际使用时可能因PI参数整定的困难而使实时性和补偿效果达不到要求;文献[7-8]提出了以微分几何控制为基础的非线性控制,采用局部近似线性化的方法对系统进行解耦,易造成局部信息的丢失而影响控制性能;文献[9-10]采用了智能控制方法,提高了系统的鲁棒性和自适应性,虽然已有一些应用,但实时性仍可进一步提升。本文则通过平均功率控制来实现直流侧电压的平衡控制和无功动态补偿。

级联H桥型STATCOM功率交换过程分析

图1为星形主电路拓扑结构。从图1

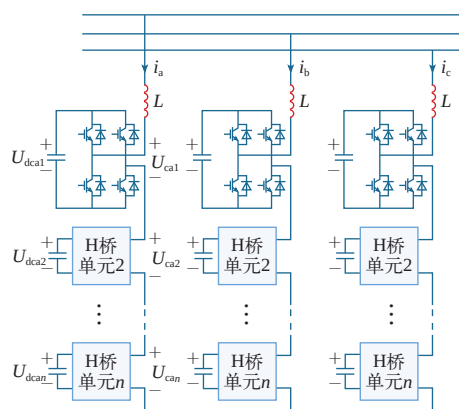


图1 星形主电路拓扑结构

河北省科技支撑计划(13212104),河北省高等学校科学技术研究青年基金(QN2015111)。



刘震宇/高级工程师

关键词/Keywords

配电网·
无功动态补偿·
级联H桥型STATCOM·
平均功率控制·

中可以看出,该装置主电路由直流侧电容、交流侧滤波电感和级联连接的H桥逆变单元构成。

图1中, $i_x(x=a,b,c)$ 为系统从电网侧吸取的相电流; $U_{dcn}(n=1,2,\dots)$ 为a相第n个H桥单元的直流侧电压; u_{can} 为a相第n个H桥单元的输出电压。

取 u_{ca} 为系统的a相输出相电压,则有

$$u_{ca} = u_{ca1} + u_{ca2} + \dots + u_{can} \quad (1)$$

在实际运行过程中,系统输出相电压 u_{cx} 和输入相电流 i_x 往往不会是标准的正弦信号,总会存在正序、负序和零序分量或谐波分量。考虑到系统采用星形主电路结构,只分析正序、负序基波分量即可,则 u_{cx} 、 i_x 表述为

$$\begin{cases} u_{ca} = U_p \sin(\omega t + \theta_p) + U_n \sin(\omega t + \theta_n) \\ u_{cb} = U_p \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_p) + U_n \sin(\omega t + \theta_n) \\ u_{cc} = U_p \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_p) + U_n \sin(\omega t + \theta_n) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_a = I_p \sin(\omega t + \varphi_p) + I_n \sin(\omega t + \varphi_n) \\ i_b = I_p \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_p) + I_n \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_n) \\ i_c = I_p \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_p) + I_n \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中, U_p 、 θ_p 分别为输出相电压的正序分量幅值和相角; U_n 、 θ_n 分别为输出相电压的负序分量幅值和相角; I_p 、 φ_p 分别为输入相电流的正序分量幅值和相角; I_n 、 φ_n 分别为输入相电流的负序分量幅值和相角。

根据平均功率以及有功、无功功率表达式可知,级联H桥型STATCOM各相的有功、无功功率表达式为

$$\begin{cases} P_a = U_p I_p \cos(\varphi_p - \theta_p) + U_p I_n \cos(\varphi_n - \theta_p) + \\ \quad U_n I_p \cos(\varphi_p - \theta_n) + U_n I_n \cos(\varphi_n - \theta_n) \\ P_b = U_p I_p \cos(\varphi_p - \theta_p) + U_p I_n \cos(\varphi_n - \theta_p - \frac{2\pi}{3}) + \\ \quad U_n I_p \cos(\varphi_p - \theta_n + \frac{2\pi}{3}) + U_n I_n \cos(\varphi_n - \theta_n) \\ P_c = U_p I_p \cos(\varphi_p - \theta_p) + U_p I_n \cos(\varphi_n - \theta_p + \frac{2\pi}{3}) + \\ \quad U_n I_p \cos(\varphi_p - \theta_n - \frac{2\pi}{3}) + U_n I_n \cos(\varphi_n - \theta_n) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Q_a = U_p I_p \sin(\varphi_p - \theta_p) + U_p I_n \sin(\varphi_n - \theta_p) + \\ \quad U_n I_p \sin(\varphi_p - \theta_n) + U_n I_n \sin(\varphi_n - \theta_n) \\ Q_b = U_p I_p \sin(\varphi_p - \theta_p) + U_p I_n \sin(\varphi_n - \theta_p - \frac{2\pi}{3}) + \\ \quad U_n I_p \sin(\varphi_p - \theta_n + \frac{2\pi}{3}) + U_n I_n \sin(\varphi_n - \theta_n) \\ Q_c = U_p I_p \sin(\varphi_p - \theta_p) + U_p I_n \sin(\varphi_n - \theta_p + \frac{2\pi}{3}) + \\ \quad U_n I_p \sin(\varphi_p - \theta_n - \frac{2\pi}{3}) + U_n I_n \sin(\varphi_n - \theta_n) \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可知

$$\begin{cases} P_a \neq P_b \neq P_c \\ P_a + P_b + P_c = 3U_p I_p \cos(\varphi_p - \theta_p) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_a \neq Q_b \neq Q_c \\ Q_a + Q_b + Q_c = 3U_p I_p \sin(\varphi_p - \theta_p) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、式(7)表明,正序、负序电压和电流会改变装置各相的有功、无功功率大小,而不会对三相总的有功、无功功率产生影响。因此,可以通过控制正序、负序电压和电流来实现系统的平均功率平衡,从而实现直流侧电压平衡控制和无功动态补偿。

直流侧电压分层控制

直流侧电压分层控制包括直流侧电压的平均功率控制和独立电容电压控制,其中直流侧电压的平均功率控制用于控制注入系统的有功功率平衡,独立电容电压控制用于实现各电容的直流侧电压平衡。图2为直流侧电压的平均功率控制策略。

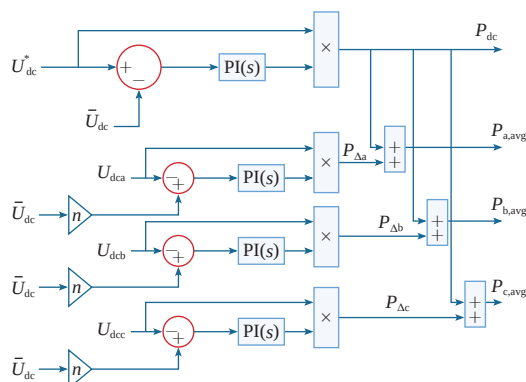


图2 直流侧电压平均功率控制策略

图2中, U_{dc}^* 为直流侧电压参考值; $\bar{U}_{dc}$ 为系统所有H桥单元直流侧电压的平均值; U_{dcx} 为各相直流侧电压之和; $P_{x,avg}$ 为系统各相所需的平均有功功率, 且有

$$P_{x,avg} = P_{dc} + P_{\Delta x} \quad (8)$$

式中, P_{dc} 为各相有功功率的恒定分量; $P_{\Delta x}$ 为各相有功功率的波动分量。

通过各相内直流侧电压的平均值与实际直流侧电压比较, 按式 (9) 计算各个独立电容的电压调节信号。图3为独立电容电压控制策略。

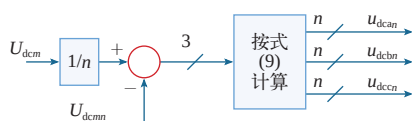


图3 独立电容电压控制策略

$$\begin{aligned} u_{dcan} &= \begin{cases} k(\frac{U_{dca}}{n} - U_{dcan}) \sin \omega t & Q_{avg} > 0 \\ -k(\frac{U_{dca}}{n} - U_{dcan}) \sin \omega t & Q_{avg} < 0 \end{cases} \\ u_{dcbn} &= \begin{cases} k(\frac{U_{dcb}}{n} - U_{dcbn}) \sin(\omega t - 120^\circ) & Q_{avg} > 0 \\ -k(\frac{U_{dcb}}{n} - U_{dcbn}) \sin(\omega t - 120^\circ) & Q_{avg} < 0 \end{cases} \\ u_{dccn} &= \begin{cases} k(\frac{U_{dcc}}{n} - U_{dccn}) \sin(\omega t + 120^\circ) & Q_{avg} > 0 \\ -k(\frac{U_{dcc}}{n} - U_{dccn}) \sin(\omega t + 120^\circ) & Q_{avg} < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} i_{q,ref}^p \\ i_{d,ref}^p \\ i_{q,ref}^n \\ i_{d,ref}^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{u_q^p + u_q^n}{2} & \frac{u_d^p - u_d^n}{2} & \frac{u_q^p + u_q^n}{2} & \frac{u_d^p - u_d^n}{2} \\ \frac{u_q^p}{2} - \frac{u_q^n}{4} + \frac{\sqrt{3}u_d^n}{4} & \frac{u_d^p}{2} + \frac{\sqrt{3}u_q^n}{4} + \frac{u_d^n}{4} & \frac{u_q^n}{2} - \frac{u_q^p}{4} + \frac{\sqrt{3}u_d^n}{4} & \frac{u_d^n}{2} + \frac{\sqrt{3}u_q^p}{4} + \frac{u_d^p}{4} \\ \frac{u_q^p}{2} - \frac{u_q^n}{4} - \frac{\sqrt{3}u_d^n}{4} & \frac{u_d^p}{2} - \frac{\sqrt{3}u_q^n}{4} + \frac{u_d^n}{4} & \frac{u_q^n}{2} - \frac{u_q^p}{4} - \frac{\sqrt{3}u_d^n}{4} & \frac{u_d^n}{2} + \frac{\sqrt{3}u_q^p}{4} + \frac{u_d^p}{4} \\ -\frac{3u_d^p}{2} & \frac{3u_q^p}{2} & -\frac{3u_d^n}{2} & \frac{3u_q^n}{2} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} P_{a,avg} \\ P_{b,avg} \\ P_{c,avg} \\ Q_{avg} \end{pmatrix} \quad (13)$$

所述平均功率平衡控制方法对平均有功功率和全部无功功率进行控制, 总的瞬时无功功率按式 (12) 计算; 系统各输出相电压、相电流均包含正序、负序分量, 由式 (9) ~ 式 (11) 即可获得输出相电压的正序、负序有功和无功分量; 由

平均功率平衡控制

首先对级联H桥型STATCOM输出的相电压、相电流按式 (10)、式 (11) 进行坐标变换, 然后可根据瞬时无功功率理论得到其输出的无功功率 (见式 (12)) 和电流正、负序分量 (见式 (13))。本文所述平均功率平衡控制策略的总体框图如图4所示。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} &= \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_q^p \\ u_d^p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_q^n \\ u_d^n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} &= \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q^p \\ i_d^p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q^n \\ i_d^n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$Q_{avg} = \frac{3}{2} (u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha) \quad (12)$$

式 (13) 中的平均功率平衡控制方程获得系统需要注入的正序、负序有功和无功电流分量参考值 $i_{d,ref}^p$ 、 $i_{q,ref}^p$ 、 $i_{d,ref}^n$ 和 $i_{q,ref}^n$, 再通过电流控制器得到输出相电压的 α 、 β 分量参考值, 与电容电压独立控制得到的对应信号叠加后最终产生各H桥单元的输出

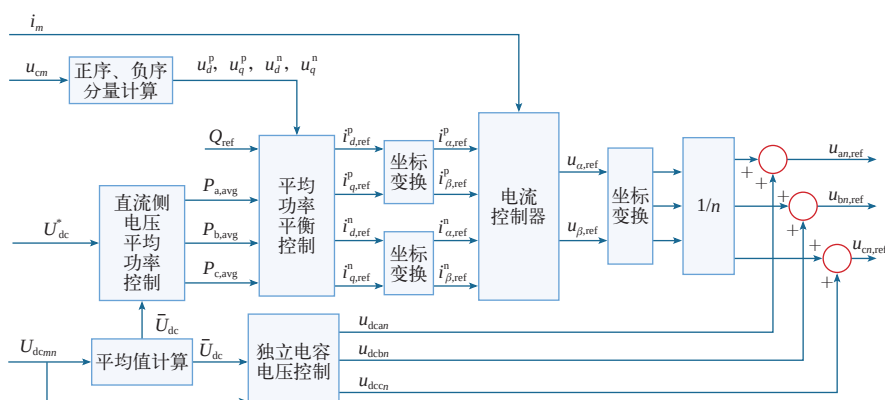


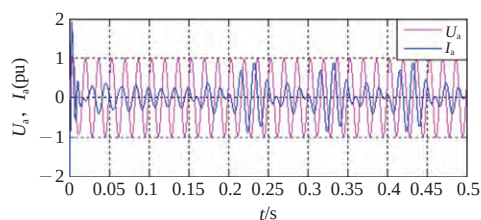
图4 平均功率平衡控制总体框图

电压调制信号 $u_{an,ref}$ 、 $u_{bn,ref}$ 和 $u_{cn,ref}$ ，即可实现直流侧电压的平衡控制和无功功率的动态补偿。

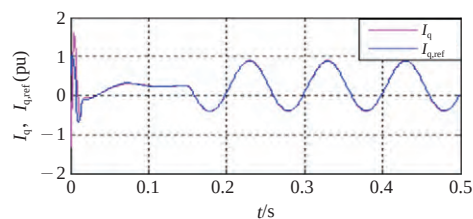
仿真分析

仿真模型主电路参见图1，仿真参数如下：H 桥级联单元数为2，电网频率为50 Hz，补偿节点电压为25 kV，交流侧滤波电感为0.8 mH，直流侧电容为0.01 F，直流侧电压指令值为1.25 kV，无功补偿容量为 ± 3 Mvar，开关器件频率为1.5 kHz。

仿真过程在电网节点电压平衡的条件下进行，负载包含恒定负载和可变负载，在 $t = 0.15$ s 时，可变负载产生10 Hz的频率波动，从而验证系统对于负载无功功率的跟踪补偿性能。图5为动态无功补偿仿真波形。



(c) a相电压、电流动态波形

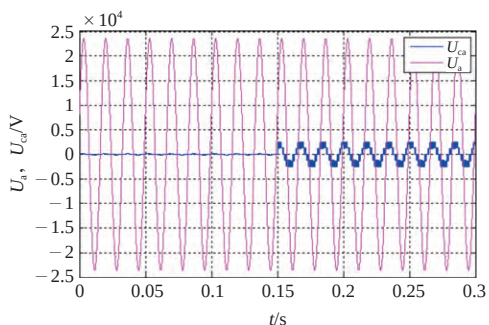


(d) 无功电流分量动态跟踪波形

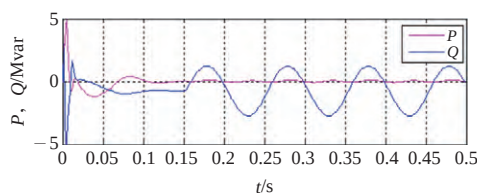
图5 动态无功补偿仿真波形

由图5a可以看出，在可变负载的无功功率波动时刻，装置输出按正弦规律变化的5电平阶梯波，用以调节装置注入电网侧的无功补偿电流而实现电网侧的无功功率补偿；由图5b可以看出，装置输出无功功率能很好地跟踪负载的无功功率波动，而有功功率基本维持不变；由图5c可以看出，电网相电压基本保持不变，而系统相电流的波形发生改变，且与相电压的相位差也时刻在改变，从而保证装置具有较好的跟踪补偿负载无功功率的能力；图5d中，无功电流和其参考值的波形基本重合。综上所述，所述平均功率平衡控制能很好地实现无功功率补偿，且具有响应速度快、补偿准确度高优点。

图6为直流侧电压仿真波形。图6a中，在 $0 < t < 0.15$ s 时，各相总的直流侧电压重合，几乎为一

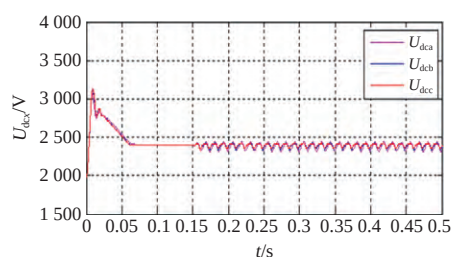


(a) 装置交流侧相电压仿真波形

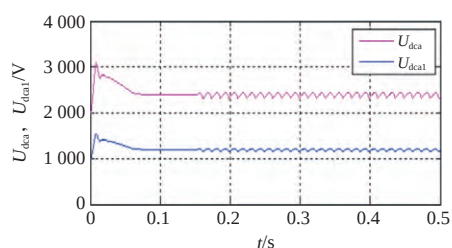


(b) 有功、无功动态波形

条平行于时间轴的轴线； $t > 0.15$ s时，直流侧电压有小幅波动，但均稳定在参考值附近，因此各相总的直流侧电压的平衡效果较好。图6b中，a相中第一个H桥单元的直流侧电容电压近似为a相总的直流侧电压的一半，因此各H桥单元的直流侧电压也得到平衡。



(a) 各相总的直流侧电压波形



(b) a相内整体与独立电容电压波形

图6 直流侧电压仿真波形

结束语

提出用于级联H桥型STATCOM的平均功率控制方法，通过控制装置输出电压、电流的正序和负序分量来调节、配置系统的平均有功、无功功率，通过对相电压、相电流的有功、无功分量参考值与实际值比较后进行直流侧电压的全局平衡和无功控制，从而同时实现了系统的无功动态补偿和直流侧电压的整体平衡。该方法控制原理简单，易于实现；Matlab/Simulink仿真结果表明，该方法达到了良好的控制和补偿效果。

参考文献

- [1] 周园. 链式STATCOM直流侧电压控制方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [2] 何大清, 危韧勇. H桥级联型静止无功发生器研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(4): 97-100.
- [3] 王志冰, 于坤山, 周孝信. H桥级联多电平变流器的直流母线电压平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 56-63.
- [4] 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): 2051-2056.
- [5] 唐杰, 刘丽. 配电网静止同步补偿器新型双闭环控制策略[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 495-500.
- [6] 姜建国, 滕达, 林川. 级联H桥型静止同步补偿器控制方法仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 98-102.
- [7] 汤赐. 配电网静止同步补偿器的非线性控制方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 18-23.
- [8] 江道灼, 张振华. 单相H桥级联静止同步补偿器反馈线性化解耦控制[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 74-79.
- [9] Anshuman S, Arindam G, Avinash J. State feedback control of multilevel inverters for D-STATCOM applications[J]. IEEE Transaction on PD, 2007, 22(4): 2409-2417.
- [10] 冉启阳, 张定宇, 郑航. 配网静止同步补偿器的改进粒子群优化PI控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 111-114.

(收稿日期: 2015-03-26) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告