

链式 D-STATCOM 的无源性控制

张茂松, 查晓明, 孙建军, 张郝, 查志鹏

(武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

Passivity-based Control of Cascade D-STATCOM

ZHANG Maosong, ZHA Xiaoming, SUN Jianjun, ZHANG Hao, ZHA Zhipeng
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: To regulate the reactive power into power grid, the distribution static synchronous compensator (D-STATCOM) has been considered as one of the most valid methods due to its salient features. Cascade D-STATCOM, constructed by cascading several identical H-bridge (single-phase full bridge) inverters, is a strong-coupled and multiple variable nonlinear system, which makes it is very difficult to simultaneously realize the reactive current, dc voltage stability and balancing control. This paper built up the passivity-based control model of single H-bridge module, and then realized the reactive current and dc voltage stability control of cascade D-STATCOM based on this. Dc voltage balancing control was realized based on the power exchange among H-bridge modules. The validity and feasibility of this control strategy is verified by simulation results, and has been used on practical engineering of ± 5 Mvar, 10 kV D-STATCOM. Based on this, a basic insurance and good platform is provided for the study and development of cascade D-STATCOM.

KEY WORDS: distribution static synchronous compensator (D-STATCOM); dynamic reactive power compensation; passivity-based theory; stability and balancing control

摘要: 配电网静止同步补偿器(distribution static synchronous compensator, D-STATCOM)由于其突出性能已被证明是配电网无功动态调节的有效手段, 然而链式结构 D-STATCOM 每一相都由多个 H 桥逆变单元级联而成, 是一个非线性多变量、强耦合的系统, 难以同时实现无功电流与直流电压稳定均衡的控制。经过等效电路变换, 建立单个 H 桥逆变单元的控制电路模型; 基于无源性控制理论, 设计无源性控制率, 确保了对指令电流的渐进跟踪; 通过给定指令电流, 实现了链式 D-STATCOM 的无功电流的控制和直流电压稳定的控制; 利用 H 桥逆变单元之间的能量交换实现了直流电压的均衡控制。仿真以及 10 kV、 ± 5 Mvar 工程实际应用表明, 此控制算法能够在实现无功电流控制的同时实现直流电压的稳定与均衡控制, 且稳态特性好、动态响应快、算法实现简单、鲁棒性强, 具有很强的工程实用价值, 为链式 D-STATCOM 的

研究、发展和产业化提供了基本保障和良好的平台。

关键词: 配电网静止同步补偿器; 动态无功调节; 无源性控制理论; 稳定均衡控制

0 引言

配电网静止同步补偿器(distribution static synchronous compensator, D-STATCOM)技术作为无功动态调节技术的潮流和发展方向, 是目前国内外研究的热点^[1-4]。D-STATCOM主要是利用大功率电力电子器件(如IGBT、GTO)构成一个自换相变流器, 通过电压源逆变技术提供超前和滞后的无功, 实现无功补偿。它具有体积小、容量大、输出特性理想、调节连续、响应速度快、补偿容量不受系统电压影响等优点, 是常规的无功补偿装置如并联电容器和静止无功补偿器(static var compensator, SVC)所无法比拟的^[5]。因此, 在电能质量问题日益严重和国家大力倡导节能降耗的今天, D-STATCOM的发展与应用正面临一个极好的机遇, 其中, 基于链式 H 桥逆变单元构成的 D-STATCOM因其具有较易实现、高可靠性和低波形失真率等优点倍受重视和关注, 也是当前输配电系统中动态无功调节主选的拓扑结构。

当 H 桥链式多电平功率单元应用于 D-STATCOM时, 在交流侧通过电抗器可直接连接到电网中, 无需通过变压器连接, 这样可以减少装置的占地面积及成本。对于这种连接方式, H 桥逆变单元直流侧是直流电容器连接, 并且相互隔离, 因而, 这种拓扑结构的 D-STATCOM 控制的任务主要有 3 个: 1) 实现满足系统要求的无功电流的控制; 2) 实现满足系统要求的 H 桥逆变单元的直流侧电容电压的总和, 即系统的直流电压稳定控制; 3) 在直流电压稳定控制的基础上实现满足这种拓

扑结构正常工作要求的自身控制,即H桥逆变单元的直流侧电容电压的均衡控制。

链式D-STATCOM每一相都由多个H桥逆变单元级联而成,是一个非线性多变量、强耦合的系统,难以同时实现无功电流与直流电压稳定均衡的控制,现有文献也少有讨论。文献[6]是通过改变D-STATCOM输出电压的幅值和相位来间接控制其无功电流,没有考虑直流电压的控制,且无功电流的控制动态响应慢,控制精度低。文献[7]是通过有功-无功解耦脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制实现链式STATCOM的无功电流与直流电压稳定控制,但是没有考虑功率单元的差异性,无法实现直流电压的均衡控制。文献[8]主要介绍了ALSTOM生产的STATCOM在直流侧采用附加电路来实现直流侧电压均衡控制,国内清华大学研制的50 Mvar的STATCOM采用开关电阻消耗方式实现直流电压均衡控制^[9]。这些都只是考虑了直流电压的均衡控制,且通过附加能量转化电路实现,电路复杂,控制效率低。文献[10]采用控制各个H桥逆变单元的输出电压相角的方法实现直流电压的均衡控制,文献[11]直接对每一个H桥逆变单元实现直流电压的PI控制。这些也都只考虑了直流电压的均衡控制,忽略了逆变单元之间的相互作用,在大容量场合由于相角的调节范围很小,实际实现非常困难。

无源性控制理论是研究非线性系统稳定性的重要工具,它是一种能量整形的方法,通过配置系统的能量和注入非线性阻尼,迫使系统总能量跟踪期望的能量函数,并使系统的状态变量渐近收敛至设定值,达到要求的性能,它的物理意义在于表明系统的能量由初始时刻到目前时刻的增长量总是小于等于外部注入的能量总和。这是一种全局定义且全局稳定的控制方法,无奇异点,控制器的设计简单,鲁棒性强^[12-14]。本文经过等效电路变换,建立单个H桥逆变单元的控制电路模型;基于无源性控制理论,设计无源性控制率,确保了对指令电流的渐进跟踪;通过给定指令电流,实现了链式D-STATCOM的无功电流的控制和直流电压稳定的控制;利用H桥逆变单元之间的能量交换实现了直流电压的均衡控制。仿真以及10 kV、±5 Mvar工程实际应用表明,此控制算法能够在实现无功电流控制的同时,实现直流电压的稳定与均衡控制,且稳态特性好、动态响应快、算法实现简单、鲁棒性强,

具有很强的工程实用性。

1 链式D-STATCOM的无源性控制

1.1 主电路拓扑

在工业电力系统中,设系统电压和负荷电流三相对称,不失一般性,任选一相为例研究链式D-STATCOM的主电路拓扑如图1所示,图中公共连接点(point of common coupling, PCC)为链式D-STATCOM接入电力系统的连接点,如果设定系统电压检测点为PCC点的电压,根据电路替代定理,等效电路可以不考虑系统阻抗。链式D-STATCOM的每相桥臂都由多个H桥逆变单元级联而成,系统采用载波移相正弦脉宽调制(sine pulse width modulation, SPWM)来控制所有开关器件的开通和关断。

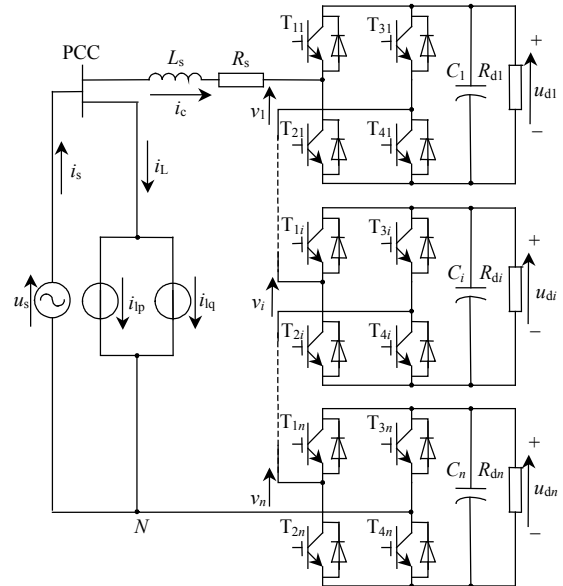


图1 链式D-STATCOM主电路拓扑

Fig. 1 Topology of cascade D-STATCOM

在图1所示电路中,设公共连接点PCC处的电压 u_s 为

$$u_s = U_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

功率开关器件工作在理想情况下,连接电抗器为 L_s , 装置损耗(包括逆变器本身的内部串联损耗和连接电抗器的损耗)用等效串联电阻 R_s 表示, n 为每相H桥逆变单元的个数, i_s 为系统侧电流, i_c 为流过链式D-STATCOM的电流, i_l 为负荷电流, i_{ip} 和 i_{iq} 分别为 i_l 的有功电流分量和无功电流分量, u_i 为第 i 个H桥逆变单元的输出电压, R_{di} 为第 i 个H桥逆变单元的等效并联电阻, C_i 为第 i 个H桥逆变单元直流侧的电容, u_{di} 为第 i 个H桥逆变单元直流侧电容的电压。

事实上, 无功功率的完全补偿就是要求系统侧电流 i_s 中的无功电流分量等于零。

1.2 单个 H 桥逆变单元模型

任选图 1 中某一个功率单元作为建模对象, 将对链式 D-STATCOM 的控制电路模型转化为对某一个功率单元的控制电路模型, 得到如图 2 所示的电路。图中, 等效电压源 u_{si} 可表示为

$$u_{si} = u_s - (L_s - L_i) \frac{di_c}{dt} - (R_s - R_i) i_c - v_1 - \dots - v_{i-1} - v_{i+1} - \dots - v_n \quad (2)$$

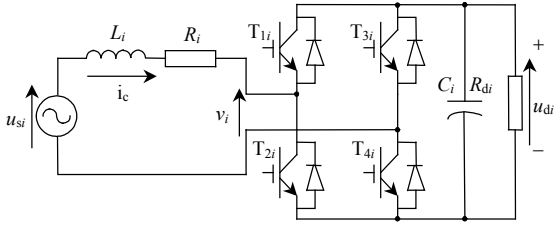


图 2 单个 H 桥逆变单元的控制模型

Fig. 2 Control model of single H-bridge module

定义开关函数:

$$s_i = \begin{cases} 1, & T_{1i}, T_{4i} \text{ 导通}, T_{2i}, T_{3i} \text{ 关断} \\ 0, & T_{1i}, T_{3i} \text{ 导通}, T_{2i}, T_{4i} \text{ 关断} \\ & \text{或 } T_{2i}, T_{4i} \text{ 导通}, T_{1i}, T_{3i} \text{ 关断} \\ -1, & T_{2i}, T_{3i} \text{ 导通}, T_{1i}, T_{4i} \text{ 关断} \end{cases}$$

对于图 2 可得如下方程:

$$\begin{cases} L_i di_c / dt + R_i i_c + s_i u_{di} = u_{si} \\ C_i du_{di} / dt + u_{di} / R_{di} - s_i i_c = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于方程(3), 由于开关函数非连续, 因此难以进行无源性控制设计。为简化分析, 忽略电力电子器件开关频率, 用占空比函数 p_i 代替开关函数 s_i , 可得如方程(4)所示的第 i 个 H 桥逆变单元的状态平均模型

$$\begin{cases} L_i di_c / dt + R_i i_c + p_i u_{di} = u_{si} \\ C_i du_{di} / dt + u_{di} / R_{di} - p_i i_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

当系统处于稳态时, 如果忽略各个 H 桥逆变单元的直流电压均衡控制的相移对等效电压源 u_{si} 的影响, 即等效电压源 u_{si} 是建立在 n 级级联 H 桥相移完全一致的理想条件下的电压矢量之和, 为了实现各个 H 桥逆变单元的功率平衡, 施加到每一个 H 桥的调制电压波形和相位相同, 则在各个 H 桥逆变单元的直流电压稳定在指令值时, 对于式(2)有

$$\begin{cases} u_{si} = u_s / n \\ R_i = R_s / n \\ L_i = L_s / n \end{cases} \quad (5)$$

1.3 无源性控制实现

设单个 H 桥逆变单元的控制目标为 $X^* = [i_c^*$

$u_d^*]^T$, 其中 i_c^* 为链式 D-STATCOM 的指令电流, u_d^* 是 H 桥逆变单元直流侧指令电压。令 $i_{ei} = i_c - i_c^*$, $u_{dei} = u_{di} - u_d^*$, 对方程组(4)进行等价变换, 可得第 i 个 H 桥逆变单元的误差系统方程为

$$\begin{cases} L_i di_{ei} / dt + p_i u_{dei} + R_i i_{ei} = u_{si} - (L_i di_c^* / dt + p_i u_d^* + R_i i_c^*) \\ C_i du_{dei} / dt - p_i i_{ei} + u_{dei} / R_{di} = - (C_i du_d^* / dt - p_i i_c^* + u_d^* / R_{di}) \end{cases} \quad (6)$$

令 $z_{ei} = [i_{ei} \ u_{dei}]^T$, 则式(6)可表示为

$$N \dot{z}_{ei} + J z_{ei} + R z_{ei} = F - (N \dot{X}^* + J X^* + R X^*) \quad (7)$$

式中: $N = \text{diag}[L_i \ C_i]$, 为正定的对角阵;

$J = \begin{bmatrix} 0 & p_i \\ -p_i & 0 \end{bmatrix}$, 为反对称矩阵, $J = -J^T$, 反映了系统

内部的互联结构; $R = \text{diag}[R_i \ 1/R_{di}]$, 为对称正定矩阵, 反映了系统的耗散特性; 系统与外部能量交换由 F 表示, $F = [u_{si} \ 0]^T$ 。

通过反馈控制, 注入阻尼

$$F - (N \dot{X}^* + J X^* + R X^*) = -R_d z_{ei} \quad (8)$$

R_d 的具体形式为 $R_d = \text{diag}[r_{d1} \ r_{d2}]$, 其中, r_{d1} , r_{d2} 称为阻尼系数, 且 $r_{d1} > 0$, $r_{d2} > 0$ 。

联立式(7)、(8), 可得

$$N \dot{z}_{ei} + J z_{ei} + R z_{ei} = -R_d z_{ei} \quad (9)$$

设误差系统方程(7)的能量存储函数为

$$H_{2ei} = \frac{1}{2} L_i i_{ei}^2 + \frac{1}{2} C_i u_{dei}^2 = \frac{1}{2} z_{ei}^T N z_{ei} \quad (10)$$

由式(9), 对式(10)两边求导, 有

$$\dot{H}_{2ei} = z_{ei}^T N \dot{z}_{ei} = -z_{ei}^T (R_d + R) z_{ei} \leq W(z_{ei}) < 0 \quad (11)$$

式中: $W(z_{ei}) = -\beta \|z_{ei}\|^2$, $\beta > 0$; $\|\cdot\|$ 为对应向量的 Euclidean 范数^[15]。

由式(10)、(11)可知, 误差系统式(7)在 $z_{ei} = [0 \ 0]^T$ 处渐近稳定, 确保了对控制目标 i_c^* 和 u_d^* 的渐近跟踪。

式(8)即为求解控制变量 p_i 的方程, 将其写成标量形式, 得

$$\begin{cases} u_{si} - (L_i di_c^* / dt + p_i u_d^* + R_i i_c^*) + r_{d1} (i_c - i_c^*) = 0 \\ -(C_i du_d^* / dt - p_i i_c^* + u_d^* / R_{di}) + r_{d2} (u_{di} - u_d^*) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知, 误差系统式(7)为欠驱动系统。

考虑 i 的任意性, 且对于每一个 H 桥逆变单元, i_c 相同, 本文在通过适当地选取 i_c^* 并控制 $i_c \rightarrow i_c^*$ 实现无功电流控制的同时, 间接地实现了直流电压稳定的控制, 即实现 $\sum_{i=1}^n u_{di} = n u_d^*$, 再利用 H 桥逆变单

元之间的能量交换实现了直流电压均衡的控制,即实现 $u_{di} \rightarrow u_d^*$ 。

2 链式 D-STATCOM 的直流电压控制

2.1 直流电压稳定控制的实现

对于第 i 个 H 桥逆变单元,在无源性控制与直流电压稳定均衡控制的作用下,当 $t \rightarrow +\infty$ 时,有 $i_c \rightarrow i_c^*$, $u_{di} \rightarrow u_d^*$,则可得图 2 所示系统的瞬时功率平衡方程

$$u_{si} i_c^* = \frac{L_i}{2} \frac{d(i_c^*)^2}{dt} + \frac{C_i}{2} \frac{d(u_d^*)^2}{dt} + R_i (i_c^*)^2 + (u_d^*)^2 / R_{di} \quad (13)$$

不考虑装置的损耗,当系统无功电流被完全补偿后流过装置的电流可表示为 $i_c = -i_{lq}$ 。

实际系统总存在损耗,因此 i_c^* 的表达式可设计为

$$i_c^* = -i_{lq} + \Delta i_c = -i_{lq} + \Delta I \cos(\omega t) \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)中,可知 u_d^* 的表达式由直流分量 \bar{u}_d^* ($\bar{u}_d^* = \int_t^{t+T} u_d^* dt / T$, T 为工频周期)和脉动分量 \tilde{u}_d^* 组成,即

$$u_d^* = \bar{u}_d^* + \tilde{u}_d^* \quad (15)$$

i_c 对每个 H 桥逆变单元均相同,因此 Δi_c 只能对链式 D-STATCOM 的直流电压稳定控制起作用,而不能克服功率单元的差异性,即不能实现各个 H 桥逆变单元的直流电压均衡控制。

求取 ΔI 必须同时考虑 \bar{u}_d^* 和 \tilde{u}_d^* 的影响。考虑到 \tilde{u}_d^* 与补偿电流大小和 H 桥逆变单元直流侧电容 C_i 有关,很难精确计算,且 $\max|\tilde{u}_d^*| \ll \bar{u}_d^*$,因此将实现 $u_{di} \rightarrow u_d^*$ 简化为实现 $\bar{u}_{di} \rightarrow \bar{u}_d^*$,其中 \bar{u}_{di} 为采用滑动时间窗获得的 u_{di} 在一个工频周期内的平均值,其表达式为

$$\bar{u}_{di} = \int_t^{t+T} u_{di} dt / T \quad (16)$$

根据链式 D-STATCOM 直流电压稳定控制的任务: $\sum_{i=1}^n \bar{u}_{di} = n\bar{u}_d^*$,并从提高控制系统鲁棒性的角度考虑,采用 PI 控制来获得 ΔI :

$$\Delta I = -(k_{p1} + k_{i1}/s) (\sum_{i=1}^n \bar{u}_{di} - n\bar{u}_d^*) \quad (17)$$

式中 k_{p1} 和 k_{i1} 分别为链式 D-STATCOM 直流电压稳定控制的比例系数和积分系数。

2.2 直流电压均衡控制的实现

开关脉冲延时差异、混合型损耗差异以及并联型损耗差异等造成了 H 桥逆变单元的特性差异,这使得需要给每个 H 桥逆变单元一个有功修正量来

维持其直流侧电容电压的均衡控制。每个 H 桥逆变单元特性差异主要由直流侧并联电阻差异反映,致使直流侧电容电压在各功率单元无调节能力情况下自动趋于平衡,并且表现出电压不均衡现象,电压不均衡程度的大小取决于并联电阻差异的大小。

考虑 $i_c^* = -i_{lq} + \Delta i_c$,且当 $t \rightarrow +\infty$ 时有 $i_c \rightarrow i_c^*$,从提高控制系统鲁棒性的角度,采用 PI 控制来获得各个 H 桥逆变单元所需要的有功修正调制波分量 Δv_i 为

$$\Delta v_i = (k_{p2} + k_{i2}/s) (\bar{u}_{di} - \bar{u}_d^*) \lambda \sin(\omega t) \quad (18)$$

式中: λ 由 i_{lq} 的性质所决定,当 i_{lq} 为感性时 $\lambda=1$,当 i_{lq} 为容性时 $\lambda=-1$; k_{p2} 和 k_{i2} 分别为链式 D-STATCOM 直流电压均衡控制的比例系数和积分系数。

实质上, H 桥链式多电平结构 D-STATCOM 的直流电压稳定控制是基于与电网有功能量的交换得到的,而直流电压的均衡控制则是在直流电压稳定控制的基础上基于 H 桥逆变单元之间的能量交换实现的电压均衡控制。显然,把各个 H 桥逆变单元赋予更多的独立性,自动实现电压均衡控制将会有优势,主要表现在这种电压均衡控制方法不过分依赖系统参数的变化和控制参数的整定。

由式(5)和式(12),考虑直流电压的均衡控制,可得第 i 个 H 桥逆变单元控制变量 p_i 的表达式为

$$p_i = \frac{1}{u_d^*} \left[\frac{u_s}{n} + r_{di} (i_c - i_c^*) - \frac{L_s}{n} \frac{di_c^*}{dt} - \frac{R_s}{n} i_c^* + \Delta v_i \right] \quad (19)$$

式中 i_c^* 、 Δv_i 分别由式(14)、(17)和(18)决定。

为简化计算,忽略 u_d^* 脉动分量 \tilde{u}_d^* 的影响,得 p_i 的简化表达式为

$$p_i = \frac{1}{\bar{u}_d^*} \left[\frac{u_s}{n} + r_{di} (i_c - i_c^*) - \frac{L_s}{n} \frac{di_c^*}{dt} - \frac{R_s}{n} i_c^* + \Delta v_i \right] \quad (20)$$

单个 H 桥逆变单元的占空比函数 p_i 的控制框图如图 3 所示。

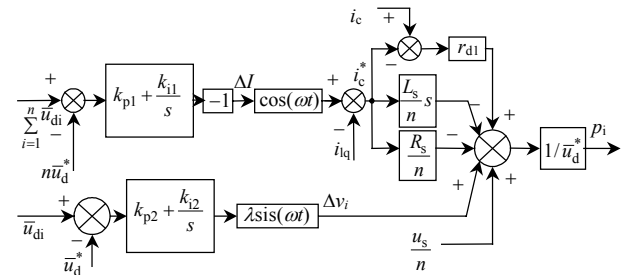


图3 单个 H 桥逆变单元的调制波框图

Fig. 3 Modulation wave graph of single H-bridge module

3 仿真与工程应用验证

3.1 仿真研究

为验证上述控制算法，本文利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建了三相星型连接，电压等级 10 kV，容量±5 Mvar 的链式 D-STATCOM 仿真模型。该仿真模型每相由 10 个 H 桥逆变单元级联而成，单元直流侧电容器大小为 13 333 μF，连接电抗器 $L_s=5$ mH，等效串联损耗电阻 $R_s=0.01 \Omega$ 。另外，为模拟工程实际中各单元特性差异，仿真模型中与直流侧电容并联的均压电阻相互各异，范围在 $2 \text{ k}\Omega \pm 20\%$ 。系统负荷分为感性和容性两组，感性负荷为每相 9.504 Ω电阻和 32.67 mH 电抗器串联连接的星型均衡负载，容性负荷为每相 9.504 Ω电阻和 338 μF 电容器串联连接的星型均衡负载。

系统的仿真流程为：在 0~1.02 s 是系统的启动过程，在 1.02~5.00 s 投感性负荷，在 5.00~5.02 s 为空载，在 5.02~9.00 s 投容性负荷。

图 4 所示为在无功电流控制和直流电压稳定均衡控制作用下链式 D-STATCOM 的 A 相 10 个单元直流电压平均值，图 5 所示为其对应系统侧 A 相电压等比缩放波形 $u_{sa}/20$ 、A 相负荷无功电流分量 q_{ila} 和流过装置的电流 i_{ca} 。从图 4 可以看出，A 相 10 个单元直流电压平均值的总和约为 10.002 kV，且最大电压差为 10.1 V，单元直流电压不均衡度小于 $(10.1/1000) \times 100\% = 1.01\%$ ，在负荷切换时直流电压也能很快稳定。从图 5 可以看出，本控制算法能够

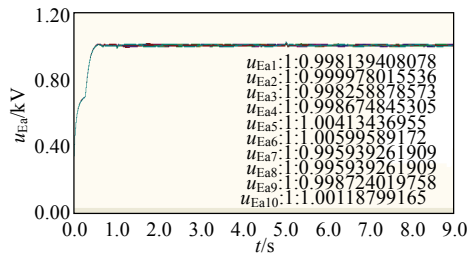


图 4 控制作用下 A 相 10 个单元直流电压平均值

Fig. 4 Average DC voltage of 10 H-bridge modules of phase A under control

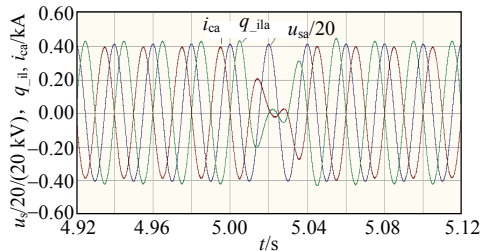


图 5 负荷切换过程系统电压及负荷无功电流和补偿电流波形
Fig. 5 Waveform of system voltage, reactive current of load and compensation current under load change

实现对负荷无功电流分量的无差拍控制，动态响应快、稳态特性好

图 6 所示为在无功电流控制和直流电压均衡控制作用下链式 D-STATCOM 的 A 相 10 个单元直流电压平均值，从图中可以看出，在 1.02~5.00 s A 相 10 个单元直流电压平均值不均衡度慢慢增大，且到 5.02 s 负荷切换后直流电压开始振荡发散。

图 7 所示为在无功电流控制和直流电压稳定控制作用下链式 D-STATCOM 的 A 相 10 个单元直流电压平均值，从图中可以看出，由于忽略了单元特性之间的差异性，虽然 10 个单元直流电压平均值的总和约为 10 kV，但最大电压差逐渐增大，影响装置可靠工作。

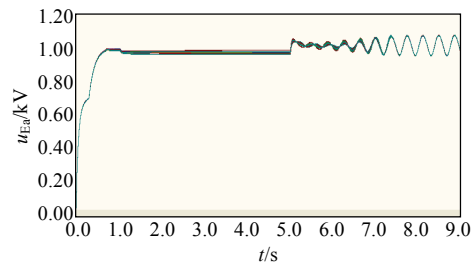


图 6 无直流电压稳定控制作用下 A 相 10 个单元直流电压平均值

Fig. 6 Average DC voltage of phase A without stability control

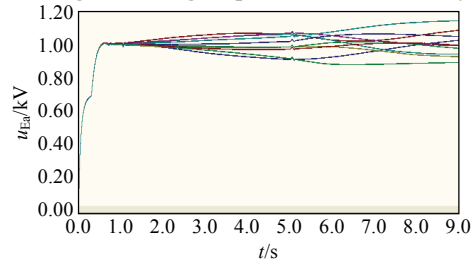


图 7 无直流电压均衡控制作用下 A 相 10 个单元直流电压平均值

Fig. 7 Average DC voltage of phase A without balancing control

3.2 工程应用验证

本控制算法在多台 10 kV、±5 Mvar 的链式 D-STATCOM 装置上得到了应用验证。装置参数为系统电压等级 10 kV，每相逆变桥个数 $N=10$ ，连接电抗器 $L_s=5$ mH。每个功率单元逆变器直流侧电容采用 10 000 μF/400V 的直流电解电容三串四并，等效容值为 $C=13 333 \mu\text{F}$ 。对于每个直流电解电容，并联的均压电阻参数为 51 kΩ/10 W。IGBT 选用 1 700 V/600 A 的单管 IGBT。控制器的实现由可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA) 和 复 杂 可 编 程 逻 辑 器 件 (complex

programmable logic device, CPLD)4 部分组成。PLC 可靠性高, 抗干扰能力强, 用于开关量逻辑控制以及人机界面数据交换。DSP 指令执行速度快, 具有快速中断响应与处理能力, 用于有效值计算以及装置系统级的保护, 包括交流过压、交流欠压、输出过流、输出速断和 PT 断线保护等。FPGA 具有体系结构和逻辑单元灵活、集成度高以及适用范围宽等特点, 用于基于无源性控制理论的无功电流控制和直流电压稳定控制, 以及利用功率单元相互作用的直流电压均衡控制。CPLD 放在功率单元驱动板上, 在产生精确的死区时间的同时, 实现功率单元直流电压的采样和保护(直流过压保护参考值为 1200V), IGBT 温度的采样和过热保护等。

整个控制器框图如图 8 所示, 其中人机界面与 PLC 采用 485 通信, PLC 与 DSP 采用 485 通信, DSP 与 FPGA 通过 DSP 的公共数据线、公共地址线、读写使能线、地址片选线以及 FPGA 的 IO 口交换数据, FPGA 与 CPLD 通过两根光纤实现命令下发以及数据交换和两根光纤发送 PWM 信号。

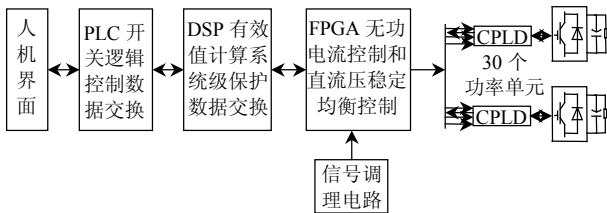


图 8 链式 D-STATCOM 控制器框图

Fig. 8 Control block of cascade D-STATCOM

图 9 所示工况为在某钢厂感性负荷全部投入时系统电压和系统电流的波形, 通过在公共母线上并联一台链式 D-STATCOM 装置后, 系统电压和系统电流波形如图 10 所示。从图中可以看出, 基于无源性控制理论的无功电流控制算法在链式 D-STATCOM 装置的应用中控制的稳态特性好, 输出电流特性理想, 谐波含量小, 在增强系统稳定性

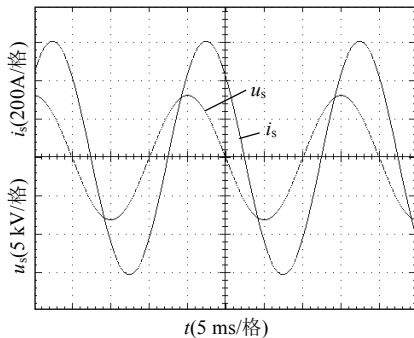


图 9 感性负荷下系统电压和系统电流波形

Fig. 9 Waveforms of system voltage and current before compensation

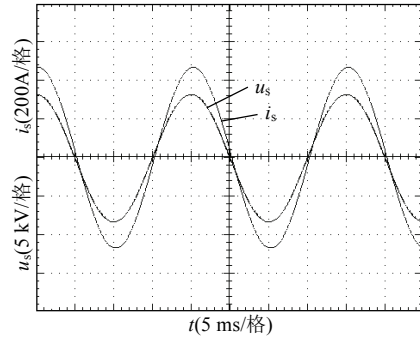


图 10 补偿后系统电压和系统电流波形

Fig. 10 Waveforms of system voltage and current after compensation

的同时给该厂带来了巨大的经济效益。

在链式 D-STATCOM 额定工作时, 采用直流电压稳定均衡控制算法的三相直流电压在人机界面的显示如表 1 所示, 此时最大电压差值为 29 V, 且三相直流电压总和分别为 1 000 3、9 998 和 10 009 V。不采用控制算法, 装置随着输出电流的增大功率单元的直流电压偏差逐渐加大, 当输出电流达到一定程度(本装置为 20~30 A), 因功率单元直流过压而保护动作, 封锁所有 IGBT 脉冲。可以看出, 采用直流电压稳定均衡控制算法能够有效的实现链式 D-STATCOM 的直流电压稳定均衡控制, 效果明显。

表 1 采用稳定均衡控制算法时 30 个单元直流电容电压

Tab. 1 DC voltage of 30 H-bridge modules under stable and balancing control

| 相 | 每相 10 个单元直流电压/V | | | | |
|---|-----------------|------|------|------|------|
| | A | 992 | 1012 | 990 | 991 |
| B | 1009 | 1007 | 992 | 989 | 1012 |
| C | 991 | 1015 | 994 | 991 | 1018 |
| | 1000 | 992 | 994 | 1013 | 990 |
| | 993 | 990 | 994 | 1018 | 1006 |
| | 1009 | 1000 | 1007 | 1000 | 992 |

4 结论

配电网静止同步补偿器由于其突出性能已被证明是配电网无功动态调节的有效手段, 然而链式结构 D-STATCOM 每一相都由多个 H 桥逆变单元级联而成, 是一个非线性多变量、强耦合的系统, 难以同时实现无功电流与直流电压稳定均衡的控制。本文提出了基于无源性控制理论的无功电流的控制和直流电压稳定的控制算法以及利用 H 桥逆变单元之间的能量交换实现的直流电压的均衡控制, 通过初步理论推导、仿真、试验及工程应用验证, 证明了该控制算法的可行性和可靠性。

该算法的提出及应用具有以下优点和贡献:

1) 方法实现简单, 当主电路单元数目需要扩展时, 控制复杂程度和方法不变, 便于扩展。

2) 可靠解决链式 D-STATCOM 的无功电流与直流电压稳定均衡控制, 为链式 D-STATCOM 的研究、发展和产业化提供了基本保障和良好的平台。

3) 同时为其它链式结构电力变换装置, 如级联型有源滤波器的实现提供了巨大的参考价值。

参考文献

- [1] Grunbaum R, Hasler J P, Larsson T, et al. STATCOM to enhance power quality and security of rail traction supply[C]//Proceedings of Electromotion 2009. Lille, France: IEEE, 2009: 69-74.
- [2] Kumar J, Agarwal P, Das B. Implementation of cascade multilevel inverter-based STATCOM[J]. IETE Journal of Research, 2010, 56(2): 119-128.
- [3] Hatano N, Ise T. A configuration and control method of cascade H-bridge STATCOM[C]//Proceedings of General Meeting of the IEEE-Power-and- Energy-Society. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1885-1892.
- [4] Grath B P M, Holmes D G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters[J]. IEEE Trans. on industry electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [5] Yoon J S, Kim S Y, Kim Y H, et al. The analysis of STATCOM and SVC cooperation effect[C]//Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition. Asia and Pacific. Seoul: T & D ASIA, 2009: 657-661.
- [6] 谢小荣, 崔文进, 唐义良, 等. STATCOM 无功电流的鲁棒自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 35-39.
Xie Xiaoyong, Cui Wenjin, Tang Yiliang, et al. Robust adaptive control of STATCOM's reactive current[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 35-39(in Chinese).
- [7] 魏文辉, 刘文华. 基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 23-28.
Wei Wenhui, Liu Wenhua. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 23-28(in Chinese).
- [8] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 243-251.
Xie Xiaorong, Jiang Qirong. Flexible AC transmission system, principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua university Press, 2006: 243-251(in Chinese).
- [9] 刘文华, 宋强. 基于链式逆变器的±50Mvar 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 145-150.
Liu Wenhua, Song Qiang. Balancing control of DC voltages of 50Mvar STATCOM based on cascade multilevel inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 145-150(in Chinese).
- [10] Peng Fangzheng, Lai Jihsheng, Mckeever J W, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(5): 356-364.
- [11] Dell'Aquila A, Liserre M G, Monopoli V, et al. Overview of PI-based solutions for the control of the dc-buses of a single-phase H-bridge multilevel active rectifier[C]//Proceedings of Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim: IEEE, 2004: 836-842.
- [12] Van Der Schaft A J. L2-gain and passivity techniques in nonlinear control[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 19-25.
- [13] 张振环, 刘会金. 基于欧拉-拉格朗日模型的单相有源电力滤波器无源性控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 37-44.
Zhang Zhenhuan, Liu Huijin. A novel passivity-based control algorithm for single-phase active power filter using euler-lagrange model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 37-44(in Chinese).
- [14] 王久和, 黄立培. 三相电压型 PWM 整流器的无源性功率控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 20-25.
Wang Jiuhe, Huang Lippei. Power control of three-phase Boost-type pwm rectifier based on passivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 20-25(in Chinese).
- [15] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 135-141.
Mei Shengwei, Shen Tielong, Liu Kangzhi. Modern robust control theory and application[M]. Beijing: Tsinghua university Press, 2008: 135-141(in Chinese).



张茂松

收稿日期: 2011-03-11。

作者简介:

张茂松(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子及其控制技术, 链式 STATCOM 的控制技术, mszh16@hotmail.com;

查晓明(1967), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子及其控制技术, 电能质量问题分析与调节以及实时信号检测与处理系统等;

孙建军(1975), 男, 博士, 副教授, 主要从事大功率电力电子技术应用及其研究、电能质量分析及治理等方面的研究;

张郝(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子及其控制技术, 链式 STATCOM 的控制技术;

查志鹏(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子及其控制技术, 链式 STATCOM 的控制技术。

(责任编辑 吕鲜艳)