

多电平变换器补偿不平衡负载的应用分析

潘汉广¹, 王军², 宋勇辉³

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 中国林业科学研究院研究生院, 北京 100091;
3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为了准确分析级联 H 桥星型接法变换器、级联 H 桥角型接法变换器和模块化多电平变换器在电网故障情况补偿不平衡负载的能力, 根据功率平衡原理分别建立了这三种多电平变换器的数学模型进行对比分析, 并得出结论: 基于级联 H 桥星型接法的 STATCOM 不适合补偿不平衡负载。基于级联 H 桥角型接法变换器的 STATCOM 在电网电压正常时能很好地补偿不平衡负载, 但是当电网电压发生故障时补偿不平衡负载的性能迅速降低。基于模块化多电平变换器的 STATCOM 无论是在电网电压正常还是故障不对称的情况下都能很好地补偿无功电流和负序电流。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真结果表明了理论分析的正确性和有效性。

关键词: 级联 H 桥星型接法; 级联 H 桥角型接法; 模块化多电平变换器; 不平衡负载; STATCOM

Analysis of multilevel converters in compensating unbalanced load

PAN Hanguang¹, WANG Jun², SONG Yonghui³

(1. NARI Technology Co., Ltd, Nanjing 211106, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China
3. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: In order to accurately analyze the performances of cascaded H-bridge with star connection, cascaded H-bridge with delta connection and modular multilevel converter in handling the unbalanced load under the asymmetrical grid fault condition, firstly, this paper builds mathematical models of these three multilevel converters based on the principle of power equilibrium. Then it gives contrastive analysis. The final analysis conclusion is that the STATCOM based on cascaded H-bridge with star connection converter is not suitable for compensating unbalanced load, while the STATCOM based on cascaded H-bridge with delta connection converter can work well to compensate unbalanced load when grid is normal. But the capability of compensating unbalanced load is greatly suppressed when asymmetrical grid fault happens. The the STATCOM based on modular multilevel converter works well to compensate reactive power and negative-sequence current even under serious asymmetrical grid fault condition. Finally, Matlab/simulink simulations verify the correctness and effectiveness of theoretical analysis.

Key words: cascaded H-bridge with star connection; cascaded H-bridge with delta connection; modular multilevel converter; unbalance load; STATCOM

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0136-07

0 引言

随着电力电子技术的不断创新和发展, 多电平变换器在高压大功率静止无功补偿器(STATCOM)中的应用越来越广泛^[1-4], 和传统的两电平逆变器相比, 多电平变换器具有无可比拟的诸多优点: 克服了电力电子功率器件耐压低的缺点, 通过增加级联的模块单元就可提高输出电压等级, 利用较低的开关频率就可输出较高的电压波形质量, 从而减小了开关损耗^[5-7], 除此之外, 由于模块化结构设计, 便于组装生产和维护, 具有很好的容错能力。

目前在世界各国范围内研究最多的三种多电平变换器是: 级联 H 桥星型接法(cascaded H-bridge converter with star configuration, CHBY), 级联 H 桥角型接法(cascaded H-bridge converter with star configuration, CHBD)和模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)^[8-10]。当这三种多电平变换器应用于高压大功率 STATCOM 时, 它们中的每一个模块单元都需要并联一个大容量的电容, 如果不采取任何措施, 这些诸多悬浮的电容电压将处于不平衡状态, 这将严重威胁着 STATCOM 的正常安全运行^[11-14]。

本文主要研究这三种 STATCOM 在电网发生不对称故障和带不平衡负载时对直流侧电容电压的影响, 分析它们在电网电压不对称的情况下补偿不平衡负载的能力, 通过 Mtlab 仿真, 验证本文理论分析的正确性和有效性。

1 CHBY 补偿性能分析

1.1 CHBY 数学模型

如图 1 所示为 CHBY 的拓扑结构, 在三相三线制系统中, 零序电压不会对输出电流造成影响, 因此, 针对 CHBY 的控制称之为—维自由度控制, 下面的分析中 CHBY 的三相输出电压忽略了高频谐波电压分量^[15]。

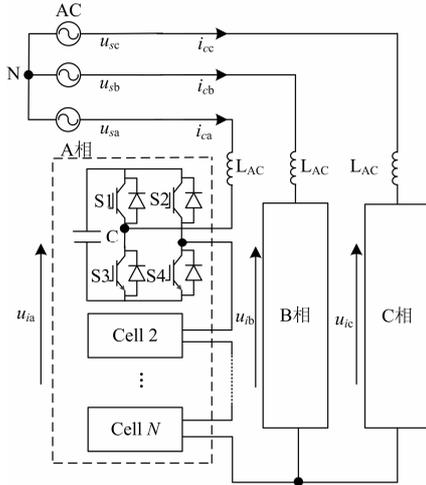


图 1 CHBY 电路拓扑结构

Fig. 1 Circuit configuration of CHBY

$$\begin{cases} u_{ia} = U_p \sin(\omega t) + U_n \sin(\omega t + \theta_n) + U_0 \sin(\omega t + \theta_n) \\ u_{ib} = U_p \sin(\omega t - 2\pi/3) + U_n \sin(\omega t + \theta_n + 2\pi/3) + \\ \quad U_0 \sin(\omega t + \theta_n) \\ u_{ic} = U_p \sin(\omega t + 2\pi/3) + U_n \sin(\omega t + \theta_n - 2\pi/3) + \\ \quad U_0 \sin(\omega t + \theta_n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{ia} , u_{ib} 和 u_{ic} 分别表示 CHBY 的三相输出相电压; U_p 、 U_n 和 U_0 分别表示输出相电压的正序分量、负序分量和零序分量的幅值。

当基于 CHBY 的 STATCOM 补偿不平衡负载时, 三相输出电流可以表示为

$$\begin{cases} i_{ca} = I_p \sin(\omega t + \varphi_p) + I_n \sin(\omega t + \varphi_n) \\ i_{cb} = I_p \sin(\omega t + \varphi_p - 2\pi/3) + \\ \quad I_n \sin(\omega t + \varphi_n + 2\pi/3) \\ i_{cc} = I_p \sin(\omega t + \varphi_p + 2\pi/3) + \\ \quad I_n \sin(\omega t + \varphi_n - 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 分别表示 CHBY 的三相输出电流; I_p 和 I_n 分别表示输出电流的正序分量和负序分量幅值。

每相吸收的平均功率为

$$\begin{cases} \overline{P_{sa}} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (u_{ia} \cdot i_{ca}) dt = \\ \quad P_{pp} + P_{nn} + P_{pn,a} + P_{np,a} + P_{0,a} \\ \overline{P_{sb}} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (u_{ib} \cdot i_{cb}) dt = \\ \quad P_{pp} + P_{nn} + P_{pn,b} + P_{np,b} + P_{0,b} \\ \overline{P_{sc}} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (u_{ic} \cdot i_{cc}) dt = \\ \quad P_{pp} + P_{nn} + P_{pn,c} + P_{np,c} + P_{0,c} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} P_{pp} = \frac{U_p I_p}{2} \cos \varphi_p \\ P_{nn} = \frac{U_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_n) \\ P_{pn,a} = \frac{U_p I_n}{2} \cos \varphi_n \\ P_{pn,b} = \frac{U_p I_n}{2} \cos(\varphi_n - 2\pi/3) \\ P_{pn,c} = \frac{U_p I_n}{2} \cos(\varphi_n + 2\pi/3) \\ P_{np,a} = \frac{U_n I_p}{2} \cos(\varphi_p - \theta_n) \\ P_{np,b} = \frac{U_n I_p}{2} \cos(\varphi_p - \theta_n + 2\pi/3) \\ P_{np,c} = \frac{U_n I_p}{2} \cos(\varphi_p - \theta_n - 2\pi/3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{0,a} = \frac{U_0 I_p}{2} \cos(\varphi_p - \theta_0) + \frac{U_0 I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_0) \\ P_{0,b} = \frac{U_0 I_p}{2} \cos(\varphi_p - \theta_0 - 2\pi/3) + \frac{U_0 I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_0 + 2\pi/3) \\ P_{0,c} = \frac{U_0 I_p}{2} \cos(\varphi_p - \theta_0 + 2\pi/3) + \frac{U_0 I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_0 - 2\pi/3) \end{cases}$$

实际上, 当 CHBY 作为 STATCOM 进行功率变换时, 也要消耗有功功率, 功率损耗可以表示为

$$\begin{cases} P_{\text{loss},a} = P_{\text{loss}} + \Delta P_a \\ P_{\text{loss},b} = P_{\text{loss}} + \Delta P_b \\ P_{\text{loss},c} = P_{\text{loss}} + \Delta P_c \end{cases} \quad (4)$$

在稳态运行时, 变换器每相吸收的功率必须等

于消耗的功率, 联合式(3)和式(4)可得到如下方程式成立。

$$P_{\text{loss}} = P_{pp} + P_{nn} \quad (5)$$

方程式(5)表明总的吸收功率的变化量与 P_{pp} 和 P_{nn} 密切相关, 通过控制 P_{pp} 和 P_{nn} 可以补偿整个系统的损耗。方程式(3)中的其他变量主要引起功率在三相之间的分配, 把式(5)代入式(3)中可以得到每相的功率平衡方程为

$$\begin{cases} P_{pn,a} + P_{np,a} + P_{0,a} - \Delta P_a = 0 \\ P_{pn,b} + P_{np,b} + P_{0,b} - \Delta P_b = 0 \\ P_{pn,c} + P_{np,c} + P_{0,c} - \Delta P_c = 0 \end{cases} \quad (6)$$

通过解功率平衡方程式(6)可得到零序电压幅值为

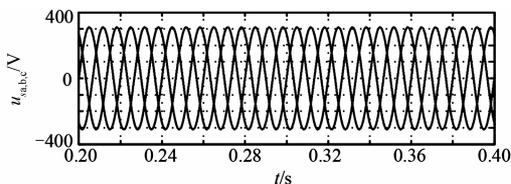
$$U_0 = \frac{2}{|I_p^2 - I_n^2|} \sqrt{\begin{aligned} & (I_p^2 + I_n^2) \cdot [A^2 + \frac{(A+2B)^2}{3}] + \\ & 2I_p I_n \cos(\varphi_p - \varphi_n) [\frac{(A+2B)^2}{3} - A^2] + \\ & \frac{4I_p I_n \sin(\varphi_n - \varphi_p) A(A+2B)}{\sqrt{3}} \end{aligned}} \quad (7)$$

式中: $A = P_{pn,a} + P_{np,a} - \Delta P_a$, $B = P_{pn,b} + P_{np,b} - \Delta P_b$ 。

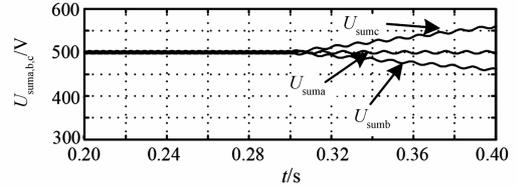
方程式(7)表明当 STATCOM 补偿不平衡负载时零序电压的幅值必须非常的高, 尤其当正序电流幅值和负序电流幅值比较接近的时候, 这在实际工程中是不允许的, 因为考虑到整个系统的成本变换器直流侧电压的幅值不可能很高。

1.2 CHBY 仿真实证

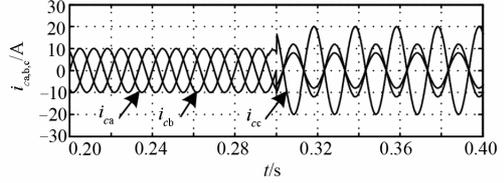
为了验证上述理论分析的正确性, 在 Matlab/Simulink 上搭建了基于 CHBY 的 STATCOM 仿真模型, 图 2 所示为仿真实验波形图。在仿真的开始阶段, STATCOM 只补偿无功功率, CHBY 三相直流侧电容电压之和处于平衡状态, 并且零序电压的幅值很小甚至忽略不计。从 0.3 s 开始 STATCOM 不仅要补偿无功功率而且要补偿负序电流, 此时模块单元直流侧电容电压开始迅速偏离参考值并且零序电压也在不断增加, 系统处于不稳定状态。因此, 基于 CHBY 的 STATCOM 不适合补偿不平衡负载, 这和前面的理论分析是一致的。



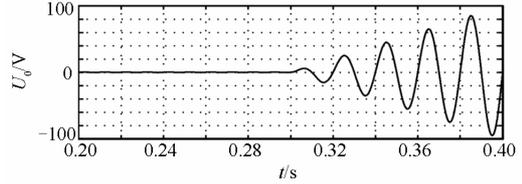
(a) 电网电压波形



(b) 三相电容电压之和波形



(c) 输出电流波形



(d) 零序电压波形

图 2 CHBY 补偿不平衡负载时的仿真波形

Fig. 2 Simulation results verifying the performance of CHBY when it is required to compensate unbalanced load

2 CHBD 补偿性能分析

2.1 CHBD 数学模型

图 3 所示为 CHBD 的电路拓扑结构图, 对于三相之间的电压平衡来讲, 零序电流可以称之为—维自由度^[16-17]。在考虑不平衡情况下, 三相电网电压包含正序电压和负序电压, 不平衡负载电流也包含正序电流和负序电流, 因此, CHBD 的三相输出电压和电流可表示为

$$\begin{cases} u_{iab} = U_{lp} \sin(\omega t) + U_{ln} \sin(\omega t + \theta_n) \\ u_{ibc} = U_{lp} \sin(\omega t - 2\pi/3) + U_{ln} \sin(\omega t + \theta_n + 2\pi/3) \\ u_{ica} = U_{lp} \sin(\omega t + 2\pi/3) + U_{ln} \sin(\omega t + \theta_n - 2\pi/3) \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_{iab} 、 u_{ibc} 和 u_{ica} 分别表示 CHBD 的三相输出线电压; U_{lp} 和 U_{ln} 分别表示输出线电压的正序电压幅值和负序电压幅值。

$$\begin{cases} i_{cu} = I_{lp} \sin(\omega t + \varphi_p) + I_{ln} \sin(\omega t + \varphi_n) + \\ \quad I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \\ i_{cv} = I_{lp} \sin(\omega t + \varphi_p - 2\pi/3) + \\ \quad I_{ln} \sin(\omega t + \varphi_n + 2\pi/3) + I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \\ i_{cw} = I_{lp} \sin(\omega t + \varphi_p + 2\pi/3) + \\ \quad I_{ln} \sin(\omega t + \varphi_n - 2\pi/3) + I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: i_{cu} 、 i_{cv} 和 i_{cw} 分别表示输出 CHBD 的三相输出电流; I_{lp} 、 I_{ln} 和 I_0 分别表示输出电流的正序、

负序和零序电流幅值。从式(1)、式(2)和式(8)、式(9)的对比中可以发现,星型接法中含有零序电压分量,但不含有零序电流分量,而角型接法恰恰与其相反。

根据上节中根据 CHBY 类似的分析方法,CHBD 吸收的功率可以通过式(8)和式(9)计算得到,根据功率平衡,零序电流幅值可表示为

$$I_0 = \frac{2}{\sqrt{U_{lp}^2 - U_{ln}^2}} \sqrt{\frac{(U_{lp}^2 + U_{ln}^2) \cdot [C^2 + \frac{D^2}{3}] + 2U_{lp}U_{ln} \cos(\theta_n) [\frac{D^2}{3} - C^2] + 4U_{ln}^2 \sin(\theta_n) \cos(\theta_n) CD}{\sqrt{3}}} \quad (10)$$

式中: $C = P_{lpn,a} + P_{lpn,a} - \Delta P_a$, $D = P_{lpn,b} + P_{lpn,b} - \Delta P_b$ 。

方程式(10)表明当电网电压发生严重不对称时,零序电流的幅值可以达到很高的值,尤其当电网正序电压幅值和负序电压幅值比较接近的时候。实际上,功率开关管的通流能力是有一定限度的,以目前的电力电子技术水平功率开关的通流能力不可能很高。所以,基于 CHBD 的 STATCOM 在电网电压发生故障不对称的情况下由于受到开关管通流能力的限制不能很好地补偿不平衡负载。

2.2 CHBD 仿真验证

图4所示为基于 CHBD 的 STATCOM 的仿真实验波形,在 0.3 s 之前 STATCOM 能很好地补偿无功功率。在 0.3 s 时刻,电网发生故障导致电网电压严重不对称,流过角型闭合回路的零序电流迅速增加,并且三相之间的直流侧电压不再保持平衡,系统处于不稳定状态,这也和前面的理论分析是吻合的。

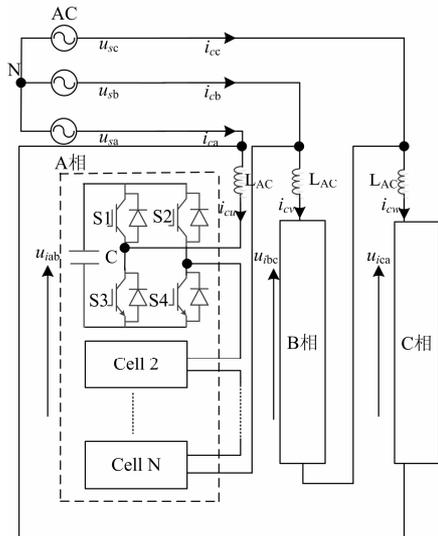


图3 CHBD 电路拓扑结构
Fig. 3 Circuit configuration of CHBD

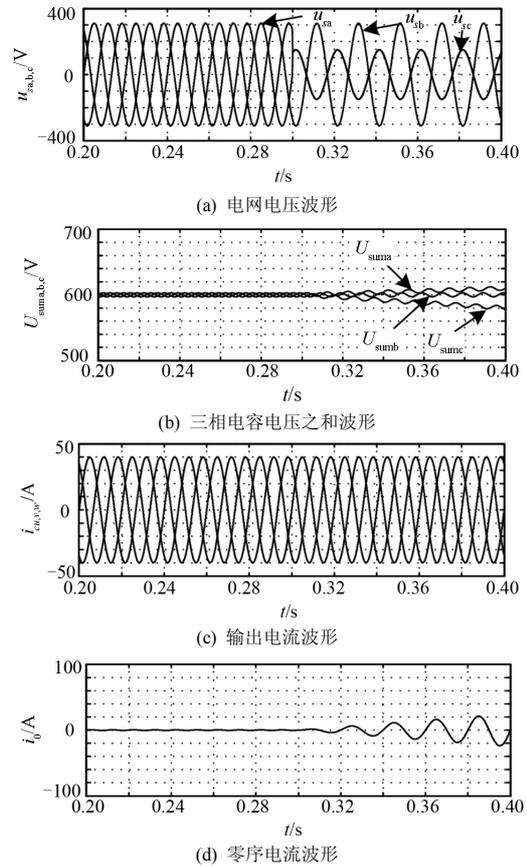


图4 CHBD 电网故障时补偿不平衡负载时的仿真波形
Fig. 4 Simulation results verifying the performance of CHBD under asymmetrical grid fault condition

3 MMC 补偿性能分析

3.1 MMC 数学模型

MMC 的主电路拓扑结构如图5所示,当考虑电网电压不对称的情况和补偿不平衡负载时,MMC

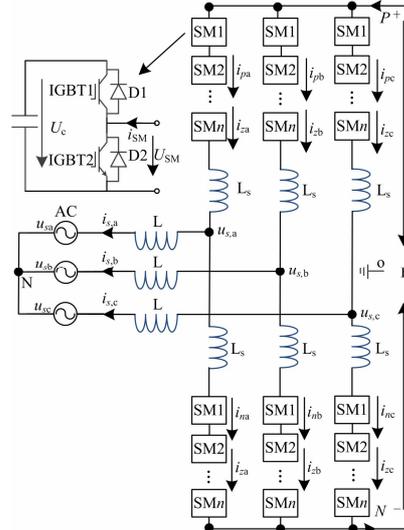


图5 MMC 电路拓扑结构
Fig. 5 Circuit configuration of MMC

三相输出电压和电流可表示为^[18-19]

$$\begin{cases} u_{s,a} = U_p \sin(\omega t) + U_n \sin(\omega t + \theta_n) \\ u_{s,b} = U_p \sin(\omega t - 2\pi/3) + U_n \sin(\omega t + \theta_n + 2\pi/3) \\ u_{s,c} = U_p \sin(\omega t + 2\pi/3) + U_n \sin(\omega t + \theta_n - 2\pi/3) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_{c,a} = I_p \sin(\omega t + \varphi_p) + I_n \sin(\omega t + \varphi_n) \\ i_{c,b} = I_p \sin(\omega t + \varphi_p - 2\pi/3) + I_n \sin(\omega t + \varphi_n + 2\pi/3) \\ i_{c,c} = I_p \sin(\omega t + \varphi_p + 2\pi/3) + I_n \sin(\omega t + \varphi_n - 2\pi/3) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $u_{s,a}$ 、 $u_{s,b}$ 和 $u_{s,c}$ 分别表示 MMC 三相输出电压； U_p 和 U_n 分别表示输出电压的正序和负序电压幅值； $i_{c,a}$ 、 $i_{c,b}$ 和 $i_{c,c}$ 分别表三相输出电流； I_p 和 I_n 分别表示电流正序和负序幅值，可以看出 MMC 的输出电压和输出电流中均不含有零序分量，这是由于 MMC 的拓扑结构决定的。

MMC 拥有两个或者三个自由度为环流提供闭合回路，总的直流侧电压和直流环流成分均在三相之间分配，考虑由直流环流成分引起的功率变化，则 MMC 每相吸收的功率为

$$\begin{cases} \overline{P_{sa}} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (u_{s,a} i_{c,a} + E i_{dc,a}) dt = \\ \quad P_{pp} + P_{nn} + P_{pn,a} + P_{np,a} + P_{dc,a} \\ \overline{P_{sb}} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (u_{s,b} i_{c,b} + E i_{dc,b}) dt = \\ \quad P_{pp} + P_{nn} + P_{pn,b} + P_{np,b} + P_{dc,b} \\ \overline{P_{sc}} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (u_{s,c} i_{c,c} + E i_{dc,c}) dt = \\ \quad P_{pp} + P_{nn} + P_{pn,c} + P_{np,c} + P_{dc,c} \end{cases} \quad (13)$$

与方程式(3)相比，方程式(13)多了由直流环流成分引起的功率 $P_{dc,x}$ (a,b,c)， $P_{dc,x}$ (a,b,c)的表达式如式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{dc,a} = E i_{dc,a} \\ P_{dc,b} = E i_{dc,b} \\ P_{dc,c} = E i_{dc,c} \end{cases} \quad (14)$$

MMC 稳态运行时，MMC 交流侧功率和直流侧功率处于平衡状态，根据方程式(13)、式(14)可得直流环流表达式为

$$\begin{cases} I_{dc,a} = \frac{1}{E} (\Delta P_a - P_{pn,a} - P_{np,a}) \\ I_{dc,b} = \frac{1}{E} (\Delta P_b - P_{pn,b} - P_{np,b}) \\ I_{dc,c} = \frac{1}{E} (\Delta P_c - P_{pn,c} - P_{np,c}) \end{cases} \quad (15)$$

式中， E 表示总的直流母线电压，方程式(15)表明由于 E 的值比较大，即使在电网电压严重不对称的情况下补偿不平衡负载时，环流依然很小甚至可以忽略不计。

3.2 MMC 仿真实验

图 6 所示为基于 MMC 的 STATCOM 仿真实验波形，在 0.3 s 之前，电网电压处于平衡状态 MMC 可以用来补偿不平衡负载。在此种情况下，可以通过引入微小的直流环流使每相的直流侧电容电压很好的处于平衡状态；在 0.3 s 时刻电网电压发生严重不对称，电网电压正序分量和负序分量几乎相等，MMC 系统依然用来补偿不平衡负载；在此过程中可以看出，电容电压平衡控制算法依然有效，每相的直流电压经过短暂的微小波动后又恢复平衡状态，在如此严重不平衡的情况下，直流环流成分依然在可以接受的范围内。因此，基于 MMC 的 STATCOM 即使在电网电压发生严重不对称故障时依然可以很好地补偿不平衡负载。

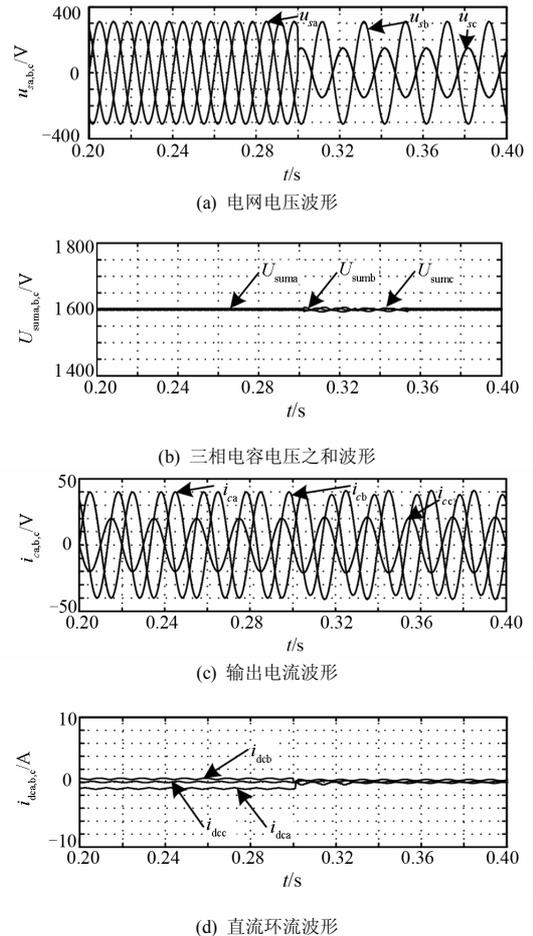


图 6 MMC 补偿不平衡负载时仿真波形

Fig. 6 Simulation results verifying the performance of MMC under asymmetrical grid fault condition

4 结论

本文首先对三种主要的多电平变换器级联H桥星型接法, 级联H桥角型接法和模块化多电平分别建立数学模型并进行了理论分析, 然后通过Matlab/Simulink进行仿真分析验证了理论分析的正确性。最后得出结论: 基于CHBY的STATCOM不适合补偿不平衡负载; 基于CHBD的STATCOM在电网电压正常时能很好地补偿不平衡负载, 但是当电网电压发生故障不对称时补偿不平衡负载的性能迅速降低; 基于MMC的STATCOM无论是在电网电压正常还是故障不对称的情况下都能很好地补偿无功电流和负序电流。

参考文献

- [1] 刘亮, 邓名高, 欧阳红林. D-STATCOM自适应检测算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 115-119.
LIU Liang, DENG Minggao, OUYANG Honglin. A research of adaptive detection algorithm for D-STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 115-119.
- [2] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC与STATCOM在大量输电通道上的应用比较[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 78-81.
DING Lijie, DU Xinwei, ZHOU Weijing. Comparison of application of SVC and STATCOM to large capacity transmission path of power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 78-81.
- [3] 张哲任, 徐政, 薛英林. MMC-HVDC系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Study of overvoltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 58-64.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-45.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-45.
- [5] 杨波, 曾光, 钟彦儒, 等. 大容量链式多电平变换器的优化CPS-PWM方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 168-178.
YANG Bo, ZENG Guang, ZHONG Yanru, et al. An optimal CPS-PWM strategy for high-power cascaded multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 168-178.
- [6] 宫力, 康勇, 陈晶晶, 等. 链式STATCOM直流电容电压分布式控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 217-223.
GONG Li, KANG Yong, CHEN Jingjing, et al. DC capacitor voltage distributed control system for cascaded multilevel STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 217-223.
- [7] 毛彦辉, 夏明超, 李晓亮, 等. 负载不平衡下D-STATCOM控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 132-139.
MAO Yanhui, XIA Mingchao, LI Xiaoliang, et al. Simulation study of the control strategy of D-STATCOM in compensating unbalance load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 132-139.
- [8] 许湘莲, 邹云屏, 丁凯, 等. 基于相移级联多电平逆变器的STATCOM研究[J]. 高电压技术, 2006, 26(5): 39-41.
XU Xianglian, ZOU Yunping, DING Kai, et al. Study of STATCOM based on cascaded multilevel inverter with phase shifted SPWM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 26(5): 39-41.
- [9] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的STATCOM分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117.
ZHU Jingsong, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117.
- [10] 杨波, 曾光, 钟彦儒, 等. 阶梯波调制法链式STATCOM直流电容电压平衡控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 281-286.
YANG Bo, ZENG Guang, ZHONG Yanru, et al. DC capacitor voltage balance control strategy of cascade STATCOM based on step wave modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 281-286.
- [11] 屠卿瑞, 徐政, 姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-38, 44.
TU Qingrui, XU Zheng, YAO Weizheng. Selecting number of voltage levels for modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 33-38, 44.
- [12] 罗振鹏, 刘永和, 杨宝峰. 多级注入式电流源型STATCOM模型和非线性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 52-57.

- LUO Zhenpeng, LIU Yonghe, YANG Baofeng. Multi-level reinjection current source converter STATCOM modeling and nonlinear control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 52-57.
- [13] 卓谷颖, 江道灼, 连霄壤. 模块化多电平换流器不平衡换流抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 118-124.
- ZHUO Guying, JIANG Daozhuo, LIAN Xiaorang. Study of unbalanced circular current suppressing for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 118-124.
- [14] AKAGI H. Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascaded converter (MMCC)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3119-3130.
- [15] 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): 543-549.
- [16] DU Sixing, LIU Jinjun, LIN Jiliang. A novel DC voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 101-111.
- [17] 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.
- [18] MOHAMMADI, PIROUZ H, TAVAKOLI BINA, M. New transformerless STATCOM topology for compensating unbalanced medium-voltage loads[C] // 13th European Conference Power Electronics and Applications, 2009, EPE' 09.
- [19] MOHAMMADI, PIROUZ H, TAVAKOLI BINA, M. A transformeless medium-voltage STATCOM topology based on extended modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1534-1545.

收稿日期: 2014-05-05; 修回日期: 2014-06-24

作者简介:

潘汉广(1968-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力电子变换技术应用等; E-mail: panhanguang2007@163.com

王 军(1988-), 男, 研究生, 研究方向为电力电子变换技术和机电一体化应用。

(编辑 张爱琴)