

级联 H 桥 APF 软启动方式的研究

汪玉凤¹, 段本涛¹, 冯 颖²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105; 2. 国网辽宁省电力有限公司
铁岭供电公司, 铁岭 112000)

摘要: 针对级联 H 桥多电平有源滤波器 APF(active power filter)在投入电网启动过程直流侧电容电压上升对级联 APF 的冲击问题,在不改变级联拓扑结构的前提下,提出一种适用于级联 APF 的软启动方式。整个软启动过程包括预充电阶段、升压充电阶段和切除充电电阻阶段,可以有效地将级联 APF 的电容电压充电至设定值,不会对 APF 造成冲击。级联 H 桥七电平仿真和实验验证了所提方法的正确性和可行性。

关键词: 级联多电平;有源电力滤波器;电压冲击;软启动

Research on Soft-start Mode of Cascaded H-bridge APF

WANG Yufeng¹, DUAN Bentao¹, FENG Ying²

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. Tieling Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd, Tieling 112000, China)

Abstract: When a cascaded H-bridge multi-level active power filter(APF) is input to power grid, the capacitor voltage surge on DC-side will impact the cascaded APF in the start-up process. To solve this problem, under the premise of not changing the cascaded topology, a soft-start mode suitable for a cascaded APF is presented. The whole soft-start process includes one precharge stage, one boost charging stage, and one stage where the charging resistor is resected. In this way, the capacitor voltage of the cascaded APF can be charged to a preset value, which will not impact the APF itself. The correctness and feasibility of the proposed method were verified by simulations and experiments conducted on a cascaded 7-level H-bridge APF.

Keywords: cascaded multi-level; active power filter(APF); voltage surge; soft-start

有源滤波器 APF(active power filter)是动态抑制谐波和补偿无功的一种装置,可以有效改善电力系统的电能质量^[1-2]。APF 投入电网后,由于 IGBT 有反向并联二极管,此时会进行整流。因为两电平 APF 与级联多电平 APF 的拓扑结构不同,所以其整流充电效果不同,在此过程中,会有电压的剧烈变化,而交流滤波电感很小,如果不对电流有所限制会出现很大的冲击电流,可能会烧毁 IGBT 与直流侧电容。另外,在整流阶段级联 APF 的电容电压

要比两电平 APF 距离实际设定值变差大,若是依靠与交流侧交换能量达到实际设定值,仍会产生较大的冲击电流。因此 APF 投入需要进行软启动,以便抑制冲击电流和直流电容电压波动对 APF 器件的影响。目前研究的 APF 软启动方法,多应用于两电平的 APF^[3-6],文献[7]提出一种电压外环与电流内环的双环软启动控制策略;文献[8]采用自调整因子的模糊控制规则设计了直流侧电容电压的模糊软启动控制器,具有精度高、鲁棒性强的特点;文献[9]针对 APF 冲击电流和电压的问题提出一种改进型 PI 控制策略,软启动效果较好;文献[10]针对 400 Hz 航空电网,为避免级联单元间直流侧电容电压不均衡,提出了一种新颖的均压控制策略。但是,针对多

收稿日期:2016-06-07;修回日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307076)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307076)

电平 APF 出现的电压冲击问题研究的还较少。

本文针对级联 H 桥 APF 的电压冲击问题,在两电平 APF 软启动方法的基础上^[1],提出级联多电平 APF 软启动的方法。在不改变原有级联拓扑结构的前提下,提出采用预充电、升压充电、切除充电电阻 3 个阶段的软启动方式,并详细分析了软启动过程中电容电压上升的原因。最后对级联 APF 软启动的方法进行仿真及实验验证,验证了所提软启动方法的有效性。

1 级联 APF 拓扑结构

级联 H 桥 APF 基本拓扑如图 1 所示。

级联 H 桥采用三相星形接法,每相由 N 个 H 桥级联组成, N 取决于 SAPF 的容量、电网电压等因素,各 H 桥直流侧电容独立与不影响。开关器件选用大功率电子器件绝缘栅双极晶体管。图中: $U_{sk}(k=a,b,c, \text{下同})$ 为三相电网侧电压; i_{sk} 为电网侧电流; i_{lk} 为负载侧电流; i_{ck} 为级联逆变器输出的补偿电流; $V_{kdi}(i=1,2,\dots,N)$ 为 H 桥直流侧电容电压。

由图 1 可知,级联 APF 的拓扑结构远比两电平 APF 拓扑结构复杂,传统用于两电平 APF 的启动方式并不能满足级联 APF 的启动。

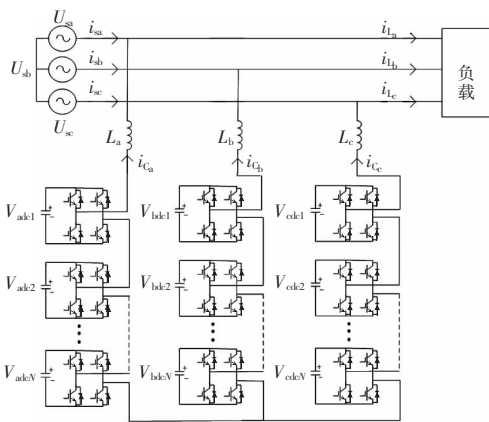


图 1 级联 H 桥多电平 SAPF 拓扑结构

Fig.1 Multi-level topology of cascade H-bridge SAPF

2 级联 APF 软启动方式的研究

级联多电平 APF 与两电平 APF 相同,原始的

整流电路不足以达到补偿的电压等级要求,也需要对其进行升压,之后用控制算法将其稳定。在现有文献中,少有文献提及级联多电平的软启动,其拓扑结构比两电平 APF 更复杂,使得其软启动过程更复杂。本文所研究的级联 SAPF 启动方式与两电平 APF 启动过程相同,由预充电阶段、升压充电阶段、切除充电电阻 3 个阶段组成。

2.1 预充电阶段

以 A 相为例,级联多电平 APF 在整流充电阶段单相等效电路,如图 2 所示,电网电压 e_a ,滤波电感 L ,充电电阻 R ,开关管 V 反向并联二极管 VD ,直流电容 C ,等效电压 U_{om} ,此处 U_{om} 为级联 APF 星形接法的公共节点与电网公共节点的电压差,在预充电过程中 U_{om} 为一交流电压,在与 A 相电网电压叠加后仍是交流电,为了便于分析,将叠加后的电压等效为标准正弦电压 U_s 。

在 U_s 正半周期,当电压大于 $2nU_D$ 即 $2n$ 个二极管导通电压时,每个 H 桥单元的 VD_1, VD_4 导通,每个 H 桥单元的电阻分压为 $(U_s - 2nU_D)/n$,在 U_s 负半周期时,与正半周期类似,其中 VD_2 与 VD_3 导通。每个 H 桥单元的电阻分压仍为 $(U_s - 2nU_D)/n$,由于二极管导通压降电压较小,在理想状态下可以忽略,于是得出平均电压的表达式为

$$\bar{U} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\sqrt{2} U_s/n) \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_s/n}{\pi} = 0.9U_s/n \tag{1}$$

在实际电容充电过程中,电容电压将稳定在电压的峰值,即每个 H 桥单元电容整流阶段的电压

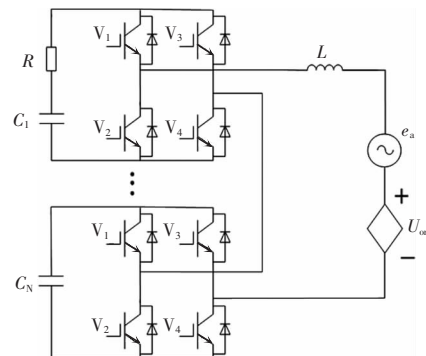


图 2 单相等效电路

Fig.2 Single-phase equivalent circuit

为 $\sqrt{2} U_s/n$ 。

如前文所述 U_{on} 为级联 APF 星形接法的公共节点与电网公共节点的电压差,在整流过程中 U_{on} 为交流电压,由于 ABC 三相的相位不同,与 U_{on} 叠加后的等效电压也会不相同,导致在整流充电阶段出现电容电压充电不平衡的情况。

2.2 升压充电阶段

级联 APF 其复杂的结构决定了不能用简单的 boost 升压电路将电容电压升高。为了不改变原有的拓扑结构,实现级联 APF 的电容充电,本文将级联拓扑的开关管进行控制,将图 2 所示的各 H 桥单元 V_4 开关管打开,此时 V_3 开关管不再起作用,其简化拓扑结构如图 3 所示。

图 3 中 n 个电容的串联,可以等效为一个电容控制各 H 桥单元 V_2 同时开通和关断。 U_{on} 为电网等效中点和直流侧 N 端之间的等效电位差,设初始状态为 U'_{on} ,此时直流电容电压为 U'_d ,在各 V_2 开关管导通时, $U_{on}=-e_a-u_L$,在各 V_2 开关管关断时 $U_{on}=U'_d-e_a-u_L-u_D$,其中 u_L 、 u_D 分别为电感电压与二极管压降电压。设 V_2 的开通时间为 t_{on} ,断开时间为 t_{off} ,故周期 T 可表示成

$$T=t_{on}+t_{off} \tag{2}$$

设 V_2 开通此阶段交流滤波电感 L_a 上存储的能量为 $(U_{on}+e_a)i_d t_{on}$,此时各个 H 桥单元的 VD_1 均无作用;当 V_2 处于断态时,断开的开关管 V_2 相当于大电阻,与除第 1 个 H 桥的其余各个 H 桥的断开的 V_1 构成回路,此时 VD_1 中流过较小的电流释放一部分电容电压能量,使各个电容的电压略有下降,但影响并不是很大。此阶段交流滤波电感上释放的能量

为 $(U_d-U_{on}-e_a)i_d t_{off}$ 。当电路工作于稳态时,一个周期 T 中交流滤波电感 L_a 存储与释放的能量相等,即

$$(U_{on}+e_a)i_d t_{on}=(U_d-U_{on}-e_a)i_d t_{off} \tag{3}$$

化简得

$$U_d=\frac{t_{on}+t_{off}}{t_{off}}(U_{on}+e_a)=\frac{T}{t_{off}}(U_{on}+e_a) \tag{4}$$

此时 $U_d>U'_d$ 由 $U'_{on}=U'_d-e_a-u_L-u_D$ 可知, $U_{on}=U'_d-e_a-u_L-u_D>U'_{on}$, U_{on} 所产生的直流电压会比 U'_d 更大,由此可知 U_d 与 U_{on} 相互影响,交替增长。而随着 U_{on} 的增长 VT_4 每一次开通、关断, L_a 的存储能量也随之增加,感应生成的 u_L 随之增大,逐渐减小每次 U_{on} 的增长量,进而影响 U_d 的增长量,当 U_d 的增长量与 u_L 相同时, U_{on} 停止增长, U_d 得到稳定值。

但在实际应用时,如果给定脉冲宽度的占空比过小,其整个升压充电过程会很慢。当达到要求值时 APF 的响应时间过长,所以一般采用大占空比,通过定时,控制脉冲数的方式对 APF 的直流电压进行充电。

由于各相等效的电压不同,所以要求在各相充电时 PWM 脉宽各不相同,以达到最好的充电效果。

2.3 切除充电电阻阶段

现有文献中,APF 软启动时在预充电结束后就将充电电阻切除^[10],但在实际实验中发现,采用上述方式切除电阻容易烧毁 IGBT,为保证级联 APF 的安全,所以本文所研究的级联 APF 软启动中切除充电电阻应该在升压充电结束后、APF 工作之前。在级联 SAPF 软启动过程中升压充电阶段电容串联,在充电阶段充电电流经过每个电容,所以整个充电过程只需一个充电限流电阻。

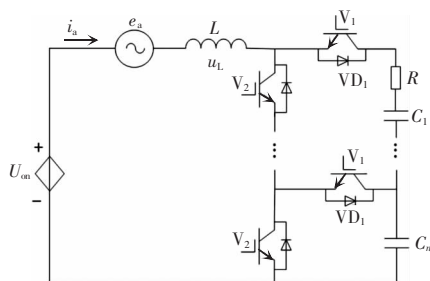


图 3 级联等效升压电路

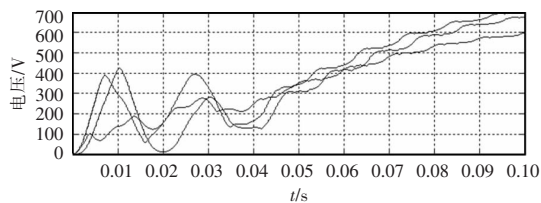
Fig.3 Cascaded equivalent boost circuit

3 仿真与实验

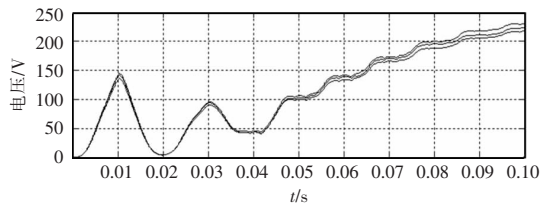
在不改变原有拓扑结构的基础上,搭建级联 H 桥 7 电平 APF 的 Matlab 仿真模型,验证所提软启动方法的可行性。仿真结果对比了使用软启动时电容电压充电波形和直接使用电容电压平衡控制算法对 APF 进行充电的波形。仿真结果如图 4、图 5 所示。图 4 为传统算法对 APF 充电的电容电压波

形,图 5 为使用软启动方式对 APF 充电的电容电压波形图。

对比图 4、图 5 可知,由电容电压平衡控制算法对直流侧电容进行充电会造成较大的电压波动,相内、相间电容电压都会造成不同程度的电压不平衡;软启动方式对直流侧电容进行充电,根据不同相对电容电压进行充电,级联 APF 在整流充电阶段因为最后等效电压差接近于 0,各相对电容充电达到饱和,电容电压达到设定值,虽然需要一定的充电时间,但最后会接近一致,不会造成过大相间电容电压不平衡,而且不会造成相内电容电压的不平衡。



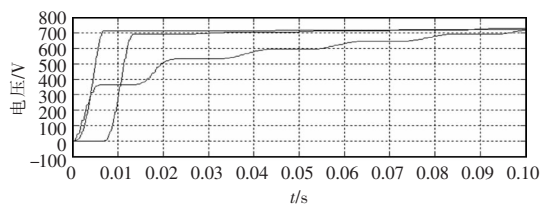
(a)相间电容电压



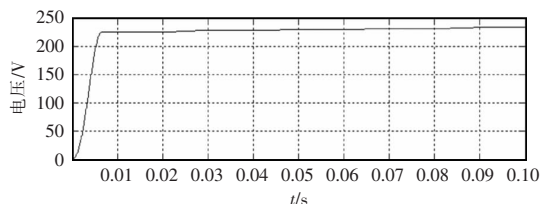
(b)相内电容电压

图 4 传统算法充电电容电压波形

Fig.4 Waveform of charging capacitor voltage using the traditional algorithm



(a)相间电容电压



(b)相内电容电压

图 5 软启动方式电容电压波形

Fig.5 Waveform of capacitor voltage in soft-start mode

为进一步验证本文所提级联 APF 软启动方式的正确性,搭建了级联 7 电平 SAPF 实验样机,样机参数如下:电网电压 380 V、50 Hz;经三相整流接阻感负载 10 Ω 、5 mH、1 000 W;IGBT 参数为 1 700 V、100 A;选用落木源 IGBT 集成驱动模块;直流侧电容为 450 V、2 200 μ F;APF 输出端滤波电抗器为 1 mH;直流侧单电容电压为 235 V;样机采用控制器为 TMS320LF2812 型 DSP 和 EP4CE 15F17C8 型 FPGA。系统采样频率 9.6 kHz。IGBT 的开关频率为 9.6 kHz。最后所得的软启动充电 A 相电容电压之和的波形如图 6 所示,A 相两 H 桥单相电容电压波形如图 7 所示。

由图 6、图 7 可知采用软启动方式对直流侧电容电压进行充电,充电过程平稳,不会对 APF 造成冲击,相内电容电压在软启动过程中几乎不存在电容电压不平衡。实验结果与仿真结果是一致的,证明了本文所提出的软启动方式的正确性与可行性。

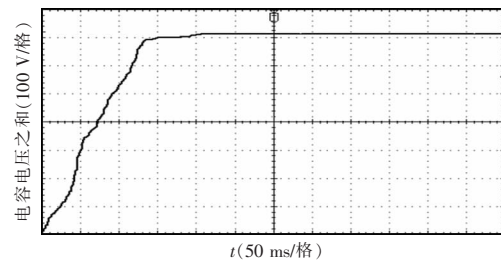


图 6 A 相电容电压之和

Fig.6 Sum of A-phase capacitor voltages

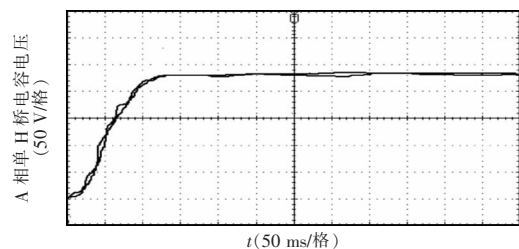


图 7 A 相两 H 桥单相电容电压

Fig.7 A-phase capacitor voltage of two single-phase H-bridges

4 结语

本文针对级联 APF 在启动过程中存在电压冲击的问题,提出一种适用于级联 APF 的软启动方

法,详细地论述了电容电压上升的原因,最后对所提出的软启动方式进行了仿真与实验。比较了采用电容电压平衡控制对电容电压充电的方式与软启动方式的充电波形,结果表明,软启动方式可以将电容电压有效充电至设定值,不会造成过大的相间电容电压不平衡,也不会造成相内电容电压不平衡,有效解决了级联APF启动过程中对APF造成的冲击问题。对工程应用具有一定的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 何满润,陈新城,程汉湘. 电力有源滤波器直流侧电压控制关键技术的研究[J]. 五邑大学学报:自然科学版, 2013, 27(2): 65-70.
He Manrun, Chen Xincheng, Cheng Hanxiang. Key techniques for DC side voltage control of active power filters[J]. Journal of Wuyi University: Natural Science Edition, 2013, 27(2): 65-70(in Chinese).
- [2] 王晓刚,谢运祥,帅定新. 智能控制方法应用于APF的综述与展望[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 35-41.
Wang Xiaogang, Xie Yunxiang, Shuai Dingxin. Overview and prospect on application of intelligent control methods to active power filters[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 35-41(in Chinese).
- [3] 程汉湘,顾媛媛,刘艺. 并联型电力有源滤波器的启动特性研究[J]. 电气应用, 2007, 26(3): 53-56.
Cheng Hanxiang, Gu Yuanyuan, Liu Yi. The start-up characteristic research of shunt active power filter[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(3): 53-56(in Chinese).
- [4] 王淮生,夏慧峰. 并联有源电力滤波器的软启动[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(3): 209-213.
Wang Huaisheng, Xia Hui Feng. Research on the soft-startup of the shunt active power filter[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(3): 209-213(in Chinese).
- [5] 耿攀,戴珂,方昕,等. 大容量并联型有源电力滤波器的软启动技术[J]. 通信电源技术, 2006, 23(1): 12-15.
Geng Pan, Dai Ke, Fang Xin, et al. Soft start-up technique for large power shunt active power filter[J]. Telecom Power Technologies, 2006, 23(1): 12-15(in Chinese).
- [6] 杨剑锋,王帅,谢延凯. 有源电力滤波器电容电压启动控制研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(2): 46-48.
Yang Jianfeng, Wang Shuai, Xie Yankai. Research on start control of capacitor voltage in active power filter[J]. Power Electronics, 2014, 48(2): 46-48(in Chinese).
- [7] 罗其锋,程汉湘,于树海,等. 有源电力滤波器双环软启动实用控制策略分析[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(4): 52-56.
Luo Qifeng, Cheng Hanxiang, Yu Shuhai, et al. Practical control strategy analysis on dual-loop soft-startup for active power filter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy, 2010, 29(4): 52-56(in Chinese).
- [8] 何娜,武健,徐殿国. 有源电力滤波器模糊软启动控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 115-120.
He Na, Wu Jian, Xu Dianguo. Fuzzy soft-startup controller of active power filter[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2007, 22(3): 115-120(in Chinese).
- [9] 杨剑锋,王帅,谢延凯. 有源电力滤波器直流侧电压专家PI控制研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(9): 71-73.
Yang Jianfeng, Wang Shuai, Xie Yankai. Research on expert PI control of active power filter DC voltage[J]. Power Electronics, 2014, 48(9): 71-73(in Chinese).
- [10] 汪昌友,陈仲,陈森,等. 一种五电平航空有源电力滤波器[J]. 电源学报, 2013, 11(3): 48-53, 57.
Wang Changyou, Chen Zhong, Chen Miao, et al. A five-level aeronautic active power filter[J]. Journal of Power Supply, 2013, 48(3): 48-53, 57(in Chinese).
- [11] 张东,吕征宇,陈国柱. 并联有源电力滤波器直流侧电容电压控制[J]. 电力电子技术, 2007, 41(10): 77-79.
Zhang Dong, Lü Zhengyu, Chen Guozhu. Capacitor voltage control of shunt active power filter[J]. Power Electronics, 2007, 41(10): 77-79(in Chinese).



汪玉凤

作者简介:

汪玉凤(1962-),女,硕士,教授,博士生导师,研究方向:电网电能质量调节与控制、电力系统调度自动化、矿山自动化与信息化等,E-mail:252021919@qq.com。

段本涛(1989-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电力系统谐波抑制与无功补偿,E-mail:1014629613@qq.com。

冯颖(1974-),女,本科,电力工程技术工程师,研究方向:电力系统自动化,E-mail:fengying_0514@163.com。