

并联型有源电力滤波器限流补偿策略研究

杨振宇, 赵剑锋, 唐国庆

(东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 分析了系统突变情况时并联型有源电力滤波器(APF)发生过流的情况,从参考电流角度提出了截断限流和比例限流 2 种控制策略。前者将原参考补偿电流作比较限幅处理,得到新的参考电流;后者比较上周期参考补偿电流及 APF 最大允许补偿电流,得到一比例系数,参考该系数,得到本周期内新的参考电流。这 2 种方案都只对参考电流进行处理,控制实现简单,能充分利用 APF 的补偿能力,使小容量 APF 可安全运行于大谐波容量的系统中。就实现的复杂性、安全性及补偿效果而言,前者优于后者。最后,通过仿真研究验证了 2 种方案的可靠性和有效性。

关键词: 并联型有源电力滤波器; 截断限流补偿; 比例限流补偿

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)03-0021-04

0 引言

由于能动态实时补偿谐波和无功,不易与电网阻抗发生谐振以及不受电网频率波动影响等,因此,有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)近年来成为研究的热点。目前,研究的重点多集中于 APF 本身的性能方面,如主电路结构、谐波检测算法以及控制策略等^[1-4],而系统对 APF 影响的研究却不多。例如,系统发生突变(系统的谐波负荷骤增或系统发生故障等),以及接入系统谐波量较大而 APF 的补偿容量较小等情况下,如何既能保证其安全运行,又能确保补偿性能,值得研究。

APF 的功率开关器件通常对瞬时过电流非常敏感,如 IGBT 的允许值为 2 倍定额,允许时间 $\leq 20\mu\text{s}$ ^[5]。目前采用的保护措施是封锁功率开关器件的触发脉冲^[6-7],脉冲封锁期间,APF 将停止工作。若系统只是非线性负载突然增加或瞬时性故障,则 APF 将有较长的一段时间不起作用,其补偿效果大受影响。另外,小容量的 APF 会因所在系统非线性负荷较多,所需补偿量过大而无法投入运行,不能发挥其谐波抑制功能。因此,如何使 APF 少受系统影响,甚至在系统发生较大变化时,仍能发挥其谐波抑制功能,这些都是 APF 实用化过程中必须面对和解决的问题。

本文首先分析系统突变(非线性负荷骤增和系统发生短路故障)时,APF 过流的原因,并在此基础上提出 2 种限流保护措施:截断限流保护和比例限流保护。通过理论分析和仿真比较,验证了 2 种方案都能有效抑制 APF 过流,并且系统在突变期间内,APF 在其补偿能力范围内仍然可以对系统谐波进行补偿。就实现的难易程度和补偿效果而言,截断限流方式优于比例限流方式。

1 系统突变时 APF 过流原因

通常,APF 严格按检测得到的系统谐波电流进行补偿。因此,除 APF 装置本身故障造成的过流外,由外部原因造成的过流主要有以下 2 种情况:接入系统的非线性负荷突增,造成谐波补偿量增加;接入系统发生各种类型的短路或断路故障,造成不对称分量的补偿大幅增加。

1.1 系统非线性负荷突增造成 APF 过流

为便于分析,假设系统电流为 i_s ,流过非线性负荷 I 和 II 电流分别为 i_{l1} 和 i_{l2} ,其中谐波分量分别为 i_{lh1} 和 i_{lh2} ,并假设 APF 只补偿谐波分量,如图 1 所示。初始状态系统接有非线性负荷 I,注入系统的谐波电流全部由 APF 进行补偿。一段时间后,一大容量的非线性负荷 II 接入系统,此时,两者的谐波电流和超出了 APF 的补偿能力,造成 APF 过流。

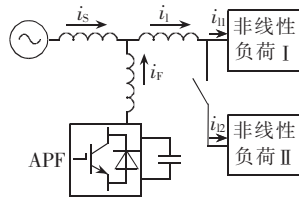


图 1 并联型 APF 对系统谐波补偿示意图

Fig.1 Harmonics compensation of shunt APF

非线性负荷 II 投入前,APF 的参考补偿电流为

$$i_{\text{ref}} = i_{lh1} \quad (1)$$

若参考电流小于 APF 正常工作允许通过的最大电流,即 $i_{\text{ref}} < i_{\text{max}}$,则 APF 输出的补偿电流 i_f 将严格跟踪参考电流 i_{ref} ,谐波电流 i_{lh1} 被补偿,未发生过流。

当非线性负荷 II 投入系统后,APF 检测到的参考电流为

$$i_{\text{ref}} = i_{lh1} + i_{lh2} \quad (2)$$

若 $i_{\text{ref}} > i_{\text{max}}$,此时,如果补偿电流 i_f 严格跟踪 i_{ref} ,则 APF 将发生过流。

由上述分析可知:系统非线性负荷突增,APF 的

参考补偿电流增大。当 i_{ref} 大于最大允许补偿电流 i_{max} , 且实际补偿电流 i_{F} 按参考电流 i_{ref} 进行跟踪, 则 APF 将发生过流。

1.2 系统发生短路故障导致 APF 过流

文献[8]对并联型 APF 在电力系统发生各种短路故障时的工作状态进行分析后得出结论: 在系统发生短路故障期间 APF 会发生过流。文献[9]给出在电力系统发生各种故障时, APF 运行的仿真波形, 同样得出了 APF 在接入系统发生各种短路故障和一些断路故障时, 发生过流。

以负荷侧单相接地短路进行分析, 如图 2 所示。

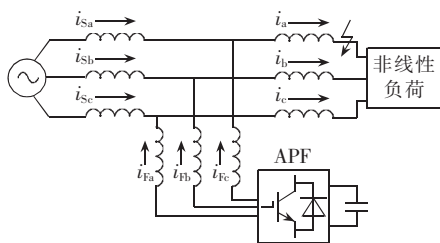


图 2 APF 接入系统负荷侧短路示意图

Fig.2 Short circuit at load side of system with APF

一般情况下, 谐波电流检测算法(如 $i_p - i_q$ 法)是将负荷侧电流中的基波正序分量剔除后的部分作为 APF 的参考补偿电流。当负荷侧 a 相发生单相短路时, a 相电流 i_a 急剧增大, 若仍以正序分量分离后的部分作为参考电流 i_{aref} , 而故障时 i_{aref} 极大, 实际补偿电流 i_{aF} 按 i_{aref} 跟踪, 则 APF 过流。

当系统发生各类短路或断路故障时, 由于 APF 除补偿谐波电流外, 通常还需要补偿负序电流或零序电流。此时, APF 参考电流将过大, 超过功率开关器件的定额, 实际补偿电流为跟踪参考电流, 导致 APF 的功率开关器件过流。

2 APF 限流保护策略

如上所述, APF 过流主要是因为要跟踪的参考电流 i_{ref} 超过限值 i_{max} 所致。因此, 从参考电流 i_{ref} 入手, 提出 2 种 APF 限流补偿方式: 截断限流补偿方式及比例限流补偿方式。

2.1 截断限流补偿方式

截断限流补偿, 是将参考电流 i_{ref} 中超过限值 i_{max} 截断, 将其限制在 i_{max} , 不超过的部分不改变。经过处理的参考补偿电流 i'_{ref} 为

$$i'_{\text{ref}} = \begin{cases} -i_{\text{max}} & i_{\text{ref}} \leq -i_{\text{max}} \\ i_{\text{ref}} & -i_{\text{max}} < i_{\text{ref}} < i_{\text{max}} \\ i_{\text{max}} & i_{\text{ref}} \geq i_{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 i_{ref} 是检测到的参考电流; i'_{ref} 是经过截断限流处理的参考电流; i_{max} 是所允许通过的最大电流。

截断限流补偿方式并没有增加控制的复杂程度, 仅在原参考电流 i_{ref} 进行简单的比较限幅处理,

即获得新的参考补偿电流 i'_{ref} , 且 APF 的实际补偿电流 i_{F} 按 i'_{ref} 跟踪即可。截断限流补偿方式下, i_{ref} 和 i'_{ref} 的关系如图 3 所示。

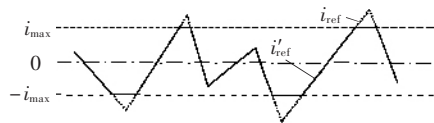


图 3 截断限流补偿方式下 i_{ref} 和 i'_{ref} 的关系

Fig.3 Relation between i_{ref} and i'_{ref} in truncating current limiting scheme

2.2 比例限流补偿方式

比例限流补偿方式下, 设定 1 个时间周期 T , 用上 1 个周期内参考补偿电流的最大绝对值 $|i_{\text{ref}}|_{\text{max}}$ 与 APF 最大允许补偿电流 i_{max} 比较, 取两者的最大值, 设为 i_{MAX} , 此时可得一个比例系数 $k (i_{\text{max}}/i_{\text{MAX}})$, 本周期的实时参考补偿电流 i_{ref} 乘上该比例系数 k , 得到该周期的新的限流参考补偿电流 i'_{ref} ; 该状态下, 第 1 个周期内 APF 不工作。经过处理的参考电流 i'_{ref} 为

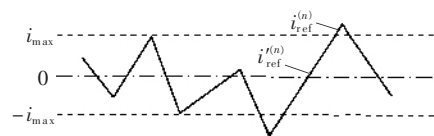
$$i'_{\text{ref}} = \begin{cases} i_{\text{ref}}^{(n)} & k^{(n-1)} \geq 1 \\ i_{\text{ref}}^{(n)} k^{(n-1)} & k^{(n-1)} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$k^{(n-1)} = i_{\text{max}} / i_{\text{MAX}}^{(n-1)} \quad (5)$$

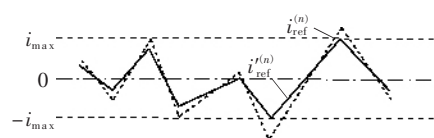
$$i_{\text{MAX}}^{(n-1)} = \max(|i_{\text{ref}}|_{\text{max}}^{(n-1)}, i_{\text{max}}) \quad (6)$$

式中 $i_{\text{ref}}^{(n)}$ 是本周期的参考补偿电流; $i'_{\text{ref}}^{(n)}$ 是本期经过按比例限流的参考电流; i_{max} 是所允许的最大补偿电流; $|i_{\text{ref}}|_{\text{max}}^{(n-1)}$ 是上个周期内参考补偿电流最大绝对值; $i_{\text{MAX}}^{(n-1)}$ 是 $|i_{\text{ref}}|_{\text{max}}^{(n-1)}$ 和 i_{max} 中较大者。

通过观察上面的计算式, 可以看出若上个周期的最大补偿电流没有超过允许的最大补偿电流 i_{max} , 则本周期参考补偿电流不作处理; 当某个周期中最大电流的绝对值 $|i_{\text{ref}}|_{\text{max}}^{(n-1)}$ 超过 i_{max} , 则下个周期开始参考电流要按比例 $k^{(n-1)}$ 限幅。在按比例限流补偿方式下 i_{ref} 和 i'_{ref} 的关系如图 4 所示, 其中 $k^{(n-1)} \geq 0$ 时, $i_{\text{ref}}^{(n)}$, $i'_{\text{ref}}^{(n)}$ 波形完全重合。



(a) $k^{(n-1)} \geq 0$



(b) $k^{(n-1)} < 0$

图 4 比例限流补偿方式下 i_{ref} 和 i'_{ref} 的关系

Fig.4 Relation between i_{ref} and i'_{ref} in proportioning current limiting scheme

3 仿真分析

3.1 电路参数和仿真内容

仿真工具采用 PSCAD/EMTDC Version 3.0.8^[10]。三相对称 380 V 低压系统,带 2 个三相可控整流桥,1 台并联型 APF 补偿整流桥产生的谐波电流,电路结构如图 1 所示。电源电压 $E_a=E_b=E_c=220\text{ V}$,工频 50 Hz。2 个整流桥完全相同,容量为 $0.08\text{ MV}\cdot\text{A}$,整流桥的控制角 α 为 45° ,带阻感性负载,电阻为 2.5Ω ,电感为 35 mH 。APF 主电路为三相三桥臂结构,连接电感为 1.5 mH ,APF 直流侧电压设为 700 V ;APF 补偿范围限制在 $\pm 60\text{ A}$ 内,参考电流计算采用 i_p-i_q 法,采用电流滞环控制策略,环宽 5 A 。

仿真内容为:初始条件 1 台 APF 对 1 台整流桥进行谐波补偿,0.2 s 时投入第 2 台整流桥,0.3 s 时切除。APF 的控制策略分别采用过流封锁脉冲方式、截断限流补偿方式以及比例限流补偿方式。在过流封锁脉冲方式下,APF 因在 0.21 s 过流而被切除,0.32 s 时投运。通过仿真,可以对 3 种 APF 控制策略的补偿效果进行比较。其中,比例限流方式下设定的周期 T 为 20 ms 。

3.2 仿真结果分析

设过流封锁脉冲为方式 1,截断限流补偿为方式 2,比例限流补偿为方式 3,下列各图所示均为 a 相仿真波形。其中, i_{a1},i_{a2} 及 i_a 分别为整流桥 I,II 的电流以及两者电流和, i_{sa} 为电源侧电流,THD $_i$ 和 THD $_{is_a}$ 为负荷侧和电源侧的电流总畸变率, i_{aref} 和 i'_{aref} 分别为原参考电流和经限流处理的参考电流, i_{Fa} 为实际补偿电流, K_a 为 i'_{aref} 与 i_{aref} 之比。

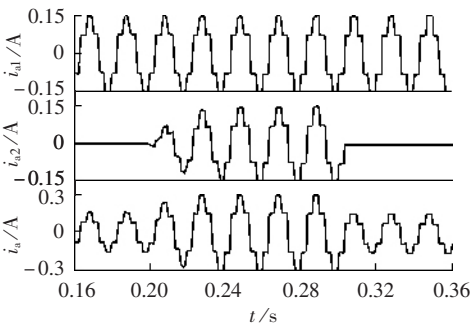


图 5 i_{a1},i_{a2} 及 i_a 波形
Fig.5 Waveforms of i_{a1},i_{a2} and i_a

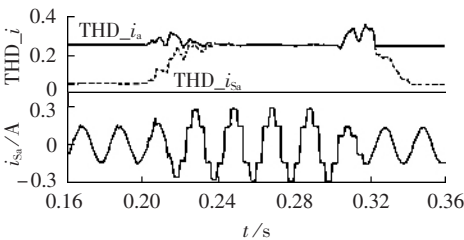


图 6 方式 1 下 THD $_i$,THD $_{is_a}$ 和 i_{sa} 波形
Fig.6 Waveforms of THD $_i$,THD $_{is_a}$ and i_{sa} under mode 1

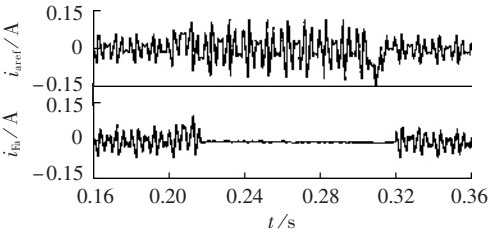


图 7 方式 1 下 i_{aref} 和 i_{Fa} 波形
Fig.7 Waveforms of i_{aref} and i_{Fa} under mode 1

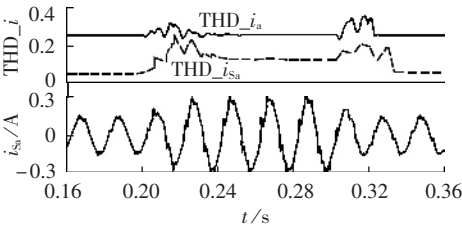


图 8 方式 2 下 THD $_i$,THD $_{is_a}$ 和 i_{sa} 波形
Fig.8 Waveforms of THD $_i$,THD $_{is_a}$ and i_{sa} under mode 2

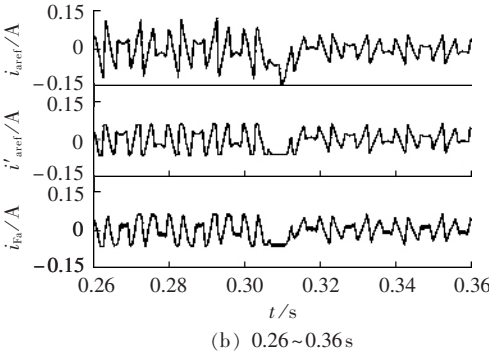
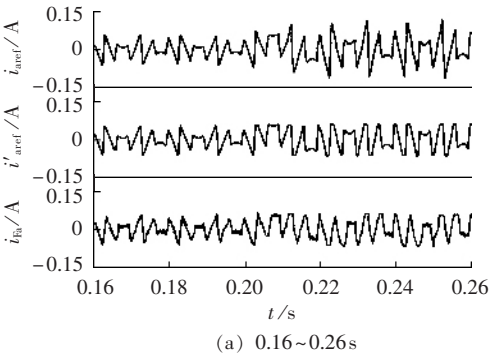


图 9 方式 2 下 i_{aref},i'_{aref} 和 i_{Fa} 波形
Fig.9 Waveforms of i_{aref},i'_{aref} and i_{Fa} under mode 2

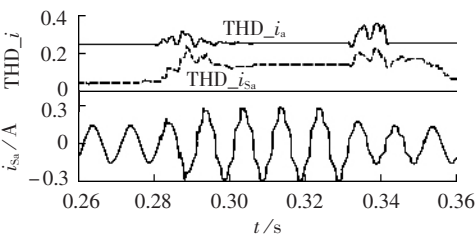
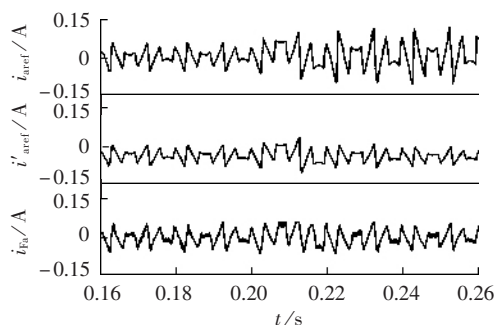
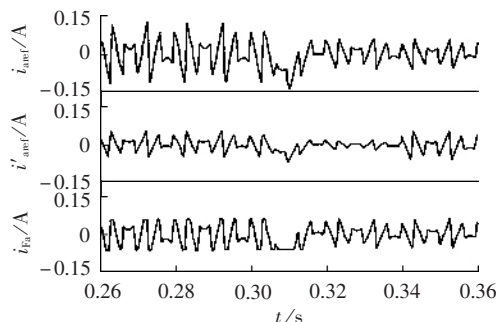


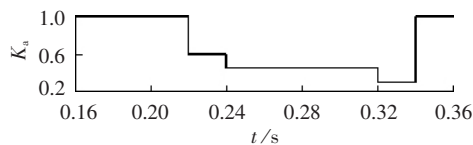
图 10 方式 3 下 THD $_i$,THD $_{is_a}$ 和 i_{sa} 波形
Fig.10 Waveforms of THD $_i$,THD $_{is_a}$ and i_{sa} under mode 3



(a) 0.16~0.26s



(b) 0.26~0.36s

图 11 方式 3 下 i_{uref} , i'_{uref} 和 i_{Fa} 波形Fig.11 Waveforms of i_{uref} , i'_{uref} and i_{Fa} under mode 3图 12 方式 3 下 i'_{uref} 和 i_{uref} 之比 K_a 波形Fig.12 Waveforms of K_a , the ratio of i'_{uref} and i_{uref}

4 结论

由上述理论推导和仿真结果,可得以下结论。

a. 当非线性负荷产生的谐波电流较小时,参考补偿电流在 APF 所允许的最大补偿电流范围内,截断限流与比例限流不起作用,非线性负荷产生的谐波电流将全由 APF 进行补偿。

b. 当非线性负荷产生的谐波电流较大时,参考补偿电流超过 APF 所允许的最大补偿电流,截断限流和比例限流开始作用,APF 实际补偿电流基本被限值在允许范围内。但因比例限流需要 1 个周期限流比例 k 的预测,因此限流效果较截断限流有一定滞后,且突变后一段时间内补偿电流无法保证限制在允许范围内;比较图 3 与图 4(b),以及图 9 与图 11,截断限流的谐波补偿量较比例限流的大;同时,比较图 8 与图 10,补偿效果截断限流优于比例限流。

c. 就实现情况而言,截断限流较比例限流简单。

通过上面的分析比较,截断限流和比例限流在非线性负荷突然增大等情况下,都能保证 APF 安全运行不过流,并且仍能有效地对谐波电流进行补偿。就谐波补偿效果、限流的安全性以及实现的复杂程度来讲,截断限流明显优于比例限流。

综上所述,截断限流作为一种控制策略,在实际应用时,对最大程度发挥 APF 补偿能力,以及防止其过流等方面,都不失为一个简单而可行的方案。

参考文献:

- [1] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*,1996,32(6):1312-1322.
- [2] AKAGI H. Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*,1997,12(1):354-363.
- [3] PENG F Z,AKAGI H,NABAE A,et al. A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation[J]. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*,1990,5(1):9-15.
- [4] DIXON J W,OOI B T. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type three-phase rectifier[J]. *IEEE Trans. Power Electron*,1998,35(4):508-515.
- [5] 陈国呈. 新型电力电子变换技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [6] 梁旭,刘文华,朱庆翔. STATCOM 保护系统新进展[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):29-31.
LIANG Xu,LIU Wen-hua,ZHU Qing-xiang. New development of protection system of STATCOM[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2000,24(23):29-31.
- [7] 梁旭,刘文华,林峰. STATCOM 保护系统设计[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):32-35.
LIANG Xu,LIU Wen-hua,LIN Feng. Design of protection system of STATCOM[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2000,24(23):32-35.
- [8] 陈玮,王彤,曾继伦. 电网短路故障时并联型电力有源滤波器的过流保护[J]. 电力系统自动化,2002,26(9):59-62.
CHEN Wei,WANG Tong,ZENG Ji-lun. Research on the overcorrect protection circuit of shunt APF[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2002,26(9):59-62.
- [9] 常鹏飞. 三相四线制有源电力滤波器控制算法研究[D]. 南京:国电自动化研究院,2005.
CHANG Peng-fei. Research on control method of three-phase four-wire active power filter [D]. Nanjing: Nanjing Automation Research Institute,2005.
- [10] 林良真,叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术,2000,24(1):65-66.
LIN Liang-zhen,YE lin. An introduction to PSCAD/EMTDC[J]. *Power System Technology*,2000,24(1):65-66.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

杨振宇(1979-),男,江苏常州人,博士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail: yang_seu@163.com);

赵剑锋(1972-),男,浙江临海人,副教授,主要从事电力电子技术在电力系统中应用的研究工作。

Research on current limiting compensation scheme of shunt APF

YANG Zhen-yu,ZHAO Jian-feng,TANG Guo-qing

(Department of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: During sudden disturbance period,over-current will occur in shunt APF(Active Power Filter). From the view of reference currents,two current limiting compensation schemes,truncating current limiting and proportioning current limiting,are proposed. The former limits the original reference compensation current to obtain new reference current,while the latter compares the reference compensation current of last period with the permissible maximal compensation current of APF to obtain the proportioning coefficient for the reference current of current period. Both schemes only deal with reference currents,easy to realize. The safe operation and full use of APF are ensured,which makes small capacity APF able to compensate large capacity harmonics of power systems. The former is better than the latter in implementation compicacy,security and compensation effect. Simulations prove the reliability and validity of both schemes.

Key words: shunt APF; truncating current limiting; proportioning current limiting