

基于DSP的三电平APF研究

在社会飞速发展的形势下，电力系统中的非线性负荷表现出与日俱增的趋势，电网轻微的扰动，就会对一些负载产生严重影响，进而造成严重后果，电能质量问题日益凸显。有效抑制电网的谐波，提高电能质量成为电力研究热点。对比两电平APF，三电平的APF能够在较低的晶闸管开关频率的条件下，对较高电压表现出很强的承受能力，也能够很好地抑制谐波畸变，同时自身的损耗也比较小，在中高压大功率的领域得到广泛的应用。聚焦三电平有源电力滤波器，对三电平变流器的设计、LCL滤波器的设计和电流跟踪控制进行研究。

于瑞龙 王 刚 徐 园/国网浙江省象山县供电有限公司

0 引言

目前，在电力系统中，谐波治理经常运用的方法就是装备滤波器，主要是有源滤波器和无源滤波器。

无源电力滤波器结构相对简单，技术比较成熟，价格成本较低，但也存在固有不足：

- 1) 易受系统阻抗影响，从而产生谐振危险。
- 2) 只能滤除设计中规定的谐波成分，通用性差。
- 3) 负载量过大时，可能导致无源电力滤波器本身过载，从而损坏。
- 4) 对负载变化敏感度较高，难以保证滤波效果。

有源电力滤波器的提出弥补了无源滤波的不足，本文着重对三电平有源电力滤波器进行研究，它能够实时监测无

功，并根据测得的电流值主动给电网补偿电流，从而抵消产生的谐波，最终实现无功补偿。并且，它的补偿具有主动性，能够实时动态补偿，对电网阻抗的敏感度较小，能够精确跟踪电网频率的变化，对电力系统中存在的谐波问题能够有效地解决，对高电压、大功率用电器在电能质量管理方面提供了高效的解决方案。

1 中点钳位三电平变流器设计

1.1 设计要求

中点钳位的三电平变流器，在众多三电平拓扑中应用最多。三电平变流器有较多的器件，复杂的换流过程，在不同的时刻，不同器件有着不同的应力，设计要求如下。

1) 尖峰时刻。进行换流时，因为存在散杂的电感，IGBT关断的时候，有较大的尖峰电压出现。此时，器件会有击穿危险，并且器件损耗也会增大。解决方法：减小回路杂散电感，降低开关的频率，在电路中设计合理的缓冲回路。

2) 中点电压不平衡。中点电压不平衡的问题通常会用SV中点平衡算法解决，通过两个小矢量对中点电压的反作用，进而调整小矢量的导通时间，最终实现中点电压平衡。

3) 内外管均压在换流过程结束后，因为二极管的单向导通性，使得某一个功率管电压变高，解决办法：①在上面并联一个RC回路，会减小杂散电感；②在回路中加入平衡电阻，阻值由平衡电



于瑞龙/高级工程师

关键词/Keywords

有源电力滤波器 ·
三电平变流器 ·
谐波治理 ·
LCL滤波器 ·
PI-RES控制 ·

压来选取。

4) 关断时序。同时关断三电平变流器的各个功率管可能会出现故障。为了确保安全,应该先关外管,再关掉内管;程序中对关内管加入延时,也可以加入自带保护功能的电路。

1.2 硬件电路设计

三电平变流器包括直流母线电容、吸收电容、充电电阻、IGBT和LCL滤波器五部分,P/O/N是直流母线的端子,A/B/C是交流输出端子,控制电路、保护电路要与主电路封装在一起,根据上面的目标以及PEBB设计的要点,本文从以下4点考虑设计方案。

1) 对于三电平变流器,硬件设计的核心就是元器件布局合理以及结构设计完美,它们对系统的杂散电感水平有至关重要的影响,从而影响各个功率器件的关断电压峰值。

2) 散热方面,对于满载运行的时候,9大功率器件的热损耗问题,可以提供冷风,从而带走产生的热量。

3) 布线要精心安排,尽可能将干扰减弱或屏蔽。

4) 电路具备较高的可靠性以及强大的抗干扰能力是基本要求,控制电路也一定要拥有强大的计算能力。

2 LCL滤波设计

补偿带宽高、开关的纹波电流低是有源电力滤波器的基本要求,LCL滤波器既够满足高频段的衰减,又能保障低频段的增益。开关频率相同的情况下,LCL用到的电感很小,对系统体积较小和成本的降低大有裨益。可是LCL属于三阶系统,可以通过添加阻尼回路,来抵消产生的谐振,从而实现系统稳定可靠地运行。

2.1 LCL滤波器研究

三电平APF的LCL包括:变流器侧 L_1 ,网侧 L_2 ,电容 C ,阻尼电阻 R_d ,忽略阻尼电阻前提下,可得单相LCL等效电路,如图1所示。

图1中, U_i 为变流器输出的相电压; U_s 为系统

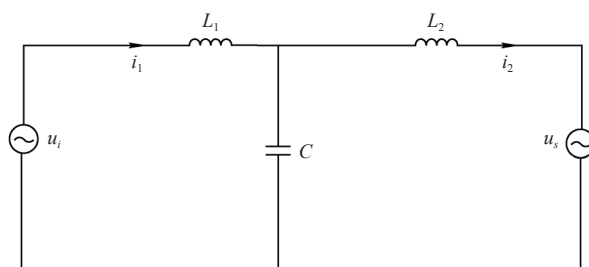


图1 LCL等效电路

电压; L_1 为变流器侧的滤波电感; L_2 为系统侧的滤波电感; C 为滤波电容。由它们构成了LCL的结构体系。 L_2 和 C 是一个低阻抗的回路,有利于高频纹波电流的通行,能够减少并网电流的高频纹波部分。

2.2 LCL滤波器的设计规则

(1) 开关纹波的衰减

在不计阻尼电阻的情况下,可得

$$\begin{cases} G_{1i}(s) = \frac{i_1(s)}{u_i(s)} = \frac{(1/L_1)(s^2 + 1/L_2 C)}{s[s^2 + (L_1 + L_2)/L_1 L_2 C]} \\ G_{2i}(s) = \frac{i_2(s)}{u_i(s)} = \frac{1/L_1 L_2 C}{s[s^2 + (L_1 + L_2)/L_1 L_2 C]} \\ H_{2i}(s) = \frac{i_2(s)}{i_1(s)} = \frac{1/L_2 C}{s^2 + 1/L_2 C} \end{cases} \quad (1)$$

对于高频谐波, $G_1(s) \approx 1/L_1 s$,可知, L_1 的选取非常重要,从IEC 6100-3-4标准可知,33次谐波的幅值要 $<0.6\%$ 基波,应用于上式可得到 $|H_{21}(s=j\omega_{sw})| \leq 0.006$ 。同理尽可能减小 $G_{2i}(s)$ 和 $H_{21}(s)$ 。 $G_1(s)$ 和 $G_{2i}(s)$ 的幅频特性相同,表明了开关频率的纹波电流通通取决于 L_1 。从电路的角度考虑,对高频分量来说,滤波电容就是短路, C 与 L_2 并联后,阻抗约等于0, L_1 的感抗决定 i_1 的大小。因此,确定 L_1 的参数时,应该从尽量减小 i_1 纹波电流这方面进行考虑。

(2) 降低电感的成本

设计电感应该从电流追踪能力以及抑制开关的纹波电流两方面进行考虑。更小的电感,能够使得APF追踪电流更迅速精确,并迅速做出反应。反之,电感越大,LCL滤波器对纹波的滤除越彻底。综上所述, L 的取值受到多方面的影响,应该

综合考虑。参考经济成本和空间利用率方面，电感值尽量减小。

(3) 最小损耗

在实际应用中，通常在某一支路（电容）上串联电阻，电阻太大，会或多或少出现一些实数极点，会使SAPF的补偿性能受到影响。可是电阻太小，又会使系统不稳定性。综上所述，电阻通常选为谐振点的电容阻抗。

2.3 设计限制条件

在设计原则满足后，要斟酌设计所遵循的规则。一般情况下，LCL滤波器设计的约束条件有 L 的大小、 C 和 L 的比例、电阻以及谐振的频率。

(1) 电容和阻尼电阻约束条件

众所周知，电容大小与LCL高频衰减能力成正比，也与消耗的无功成正比。在系统的高功率因数要求下，通常无功都不能超过5%的额定功率。在忽略网侧电感压降的情况下， U_c 近似于 U_n 。通常会使阻尼电阻跟随谐振频率容抗的增大而增大，减小而减小。

(2) 谐振频率的约束条件

为了获得APF系统较小频率的电流增益，以及对高频纹波电流有很好地抵消作用，通常将LCL谐振频率设置在最高次的补偿谐波和1/2开关频率之间。

2.4 设计流程方法

根据上面的分析、提出的设计原则以及约束条件，设计LCL滤波器步骤如下。

1) 确定所需补偿谐波的最高次数 k ，截止频率 $\omega_c > k\omega_n$ ， $\omega_{res} > k\omega_n/0.3$ （ ω_n 是基波频率）考虑谐波补偿、谐振因素，一般取： $\omega_{res} = k\omega_n/0.25 = 4k\omega_n$ ，为了抑制开关的纹波，防止低次谐波的放大，开关频率需要满足 $\omega_{sw} \geq 2\omega_{res}$ 。即 $k\omega_n/0.3 < \omega_{res} < 0.5\omega_{sw}$ ，开关的频率与谐波的补偿效果成正比，但是频率过高会增加损耗，所以，谐振频率通常设为开关频率一半。

2) 把 ω_{res} 设定完，由系统的功率和电压，算出系统的基础阻抗、感抗和容抗。 $Z_b = E_n/P_n$ ， $C_b = 1/\omega_n Z_b$ ， $L_b = Z_b/\omega_n$ 。

3) 由上式可知， $L_1 = L_2$ 时，LCL滤波器的谐振频率是最小的，抑制纹波的能力最强，所以优先使用 $L_1 = L_2$ ， $r_x = 2(\omega_n/\omega_{res})^2 = 2(1/4k)^2$ 计算可得

$$L_1 = L_2 = 1/2 \Pi f_{res} C \quad (2)$$

4) 参数校验。将所得值代入约束条件式中，如果满足约束条件，那么设计完毕；不然，代入3，改变 r 和 x 比例关系，直到满足为止。

2.5 结果分析

图2为滤波器的仿真结果，图3为LCL滤波器的仿真结果。补偿前，系统谐波的电流畸变率为72.15%，通过 L 后，畸变率变为5.96%，而通过LCL后，畸变率下降为2.50%。这一现象表明，LCL滤波器能充分抑制系统纹波电流。

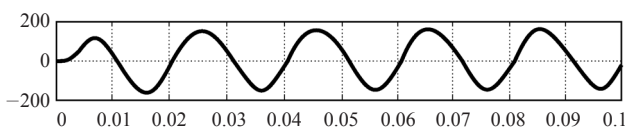


图2 L 滤波器的仿真结果

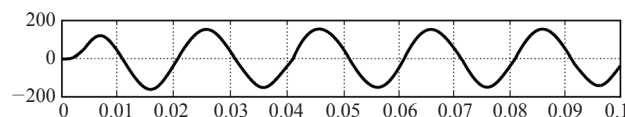


图3 LCL滤波器的仿真结果

3 三电平APF控制

APF的关键技术主要是实现对电流的控制。本文是通过 dq 旋转坐标系下的PI以及多个并联起来的谐振控制器组，对电流进行跟踪和控制。一个谐振控制器对应一个二次谐波分量控制，使系统更高效地运行。

对于基波电流分量采用PI进行跟踪

$$G_f(s) = K_{pf}(1 + 1/\tau_f s) \quad (3)$$

式中， K_{pf} 为比例增益； τ_f 为时间的积分常数。

K_{pf} 直接影响内环电流环带宽，适当选择 K_{pf} ，确保 ω_c 在需要补偿的谐波带宽内，一般， $K_{pf} = \omega_c L_T / (V_{dc}/2)$ ， $V_{dc}/2$ 是为了标幺化处理。

基波PI控制器将使电流环多出零点和极点，它们很接近，这样能抵消影响，系统的闭环特性依旧决定于LCL滤波器。实时监测追踪谐波电流，

运用 dq 旋转坐标系下多个准谐振控制器并联的方法, 计算公示为

$$G_{ch}(s) = \sum_{n=1}^k \frac{2K_{ih}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (6n\omega_n)^2} \quad (4)$$

如图4所示, 加入PI控制器后, 在满足跟踪电网谐波的前提下, 系统仍然可靠稳定运行, 实现了APF系统对低次谐波的补偿目标。

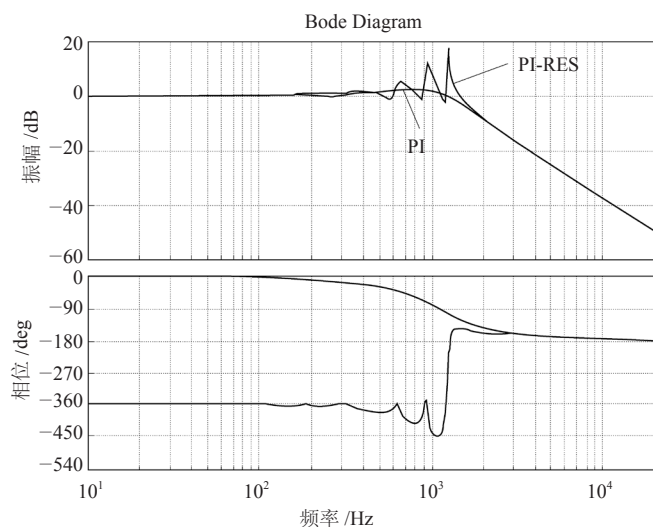


图4 电流闭环系统的幅频特性

从LCL滤波器看, 一般不会过调制。再从L滤波器出发, 由于L滤波器的电感很大, 所以会出现

较大压降, 在输出的电流饱和值上, LCL滤波器的APF比L型滤波器APF大很多。再者, 因为基波电流的频率与谐波相比无足轻重, 所以对APF而言, 谐波电流会有更大电压降产生, 但是对并网逆变器、整流器的影响却微不足道, 这是由于基波电流和感性阻抗是由一般的PWM整流器处理的。

以验证所提出的控制器的有效性为目的, 搭建出三电平有源电力滤波器系统。三电平有源电力滤波器由LCL滤波器、三电平NPC变流器和谐波负载构成。包括电流追踪控制、母线电压控制、电压平衡控制、电流内环控制和电压外环控制五种方式。

图5为系统PI控制和PI-RES控制仿真结果。

根据理论和仿真, 可以实现一套基于DSP的有源电力滤波补偿系统, 用DSP做算法, 它产生所需PWM波, 从而实现软起动、空载并网、谐波治理、无功补偿和电压平衡等功能。

借助于FLUKE435观测APF谐波治理效果, 如图6所示。投入APF前, 电网电流发生了畸变, 高达24.9%, 存在较大的5次、7次、11次和13次谐波; 投入APF后, 如图7所示, 各次谐波被滤除后, 电流畸变减小, 降至3.58%。

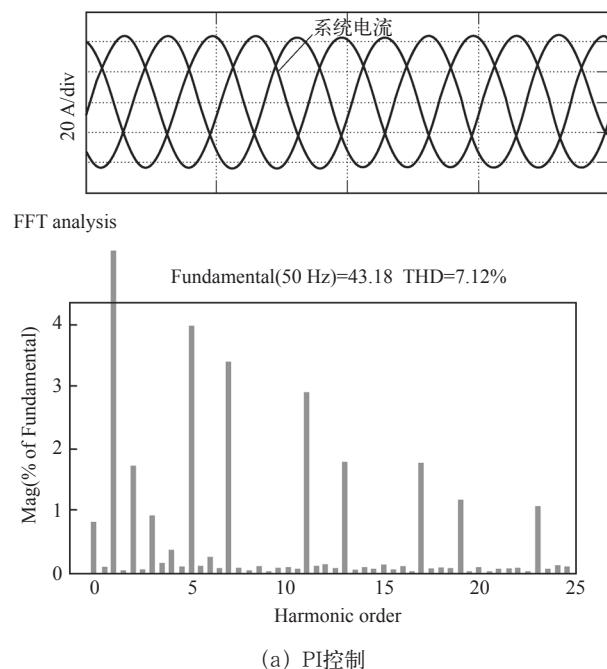
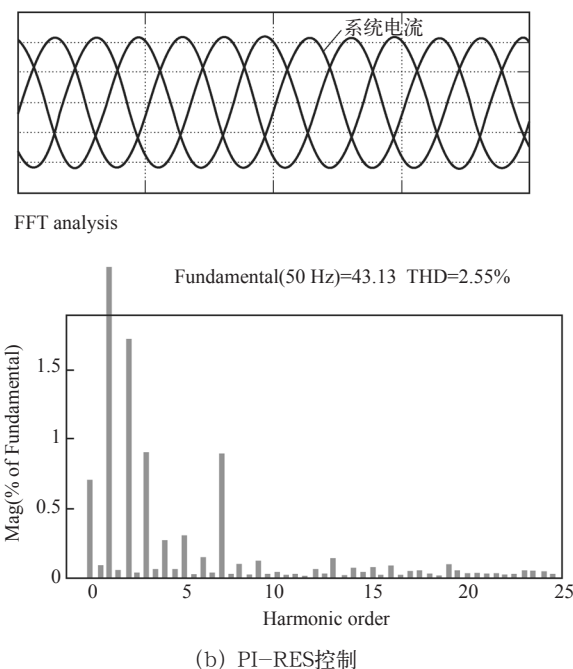


图5 不同策略下的补偿效果

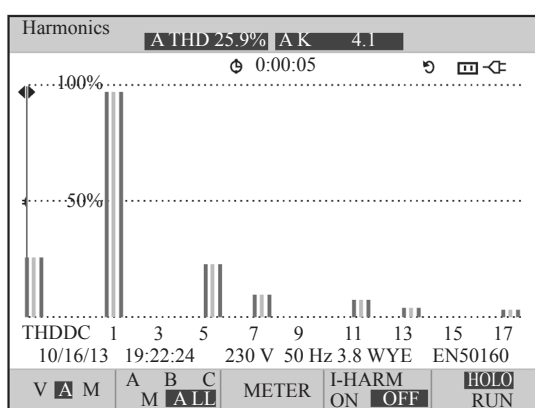


图6 APF未投入前电流频谱

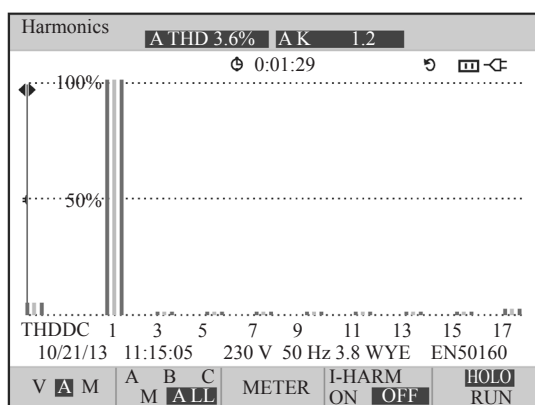


图7 APF投入后电流频谱

实验结果表明,该APF系统完美地实现了无冲击并网,在抑制谐波、补偿无功方面表现卓越,与仿真分析大体一样。

4 结束语

三电平有源电力滤波器在解决大功率电能质量问题方面应用前景广阔。本文优化了三电平有源电力滤波器的主电路结构,把NPC变流器用作主电路的结构,搭建出实验平台,布局合理、结构紧凑使系统运行时,尖峰电压更小、散热方面的管理更高效,电磁兼容的性能更高。文中阐述了一种基于三电平有源电力滤波器的设计方法,通过要补偿谐波的最高次数,来确定LCL滤波器的谐振频率,能够把低频段增益和高频段的衰减同时

兼顾到,用到的电感体积更小,成本更低,既降低了开关纹波电流,又保证了补偿谐波的增益。本文在谐波电流上,采用内同步旋转坐标下的PI和并联比例谐振控制(PI-RES)的控制器,这是一种基于LCL滤波器的电流跟踪控制方法。一个谐振控制器能够对相应的静止坐标下的两次谐波分量进行控制,使系统效率得到提高,表现出更好的动态性能,更高的跟踪准确度,具有较强的实用性。

参考文献

- [1] 王兆安,刘进军. 电力电子装置谐波抑制及无功补偿技术的进展[J]. 电力电子技术, 1997, 31(1): 100-104.
- [2] Akagi. H. Active harmonic filters[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(12).
- [3] 何英杰. 二极管钳位型三电平APF控制与谐波检测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [4] Angelo Baghini. 电能质量手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [5] 白杨. 基于DSP的三相三线制并联有源电力滤波器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [6] 何英杰,刘进军,王兆安,等. 基于重复预测原理的三电平APF无差拍控制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 114-120.
- [7] Teichmann R, Bernet S. A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drivers, traction, and utility applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3).
- [8] 查晓明,王瑾,吴晓峰,等. 基于PWM控制的并联型有源电力滤波器的MATLAB仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(3): 30-33.

(收稿日期: 2018-08-14) **EA**