

DOI: 10.7500/AEPS201107179

三相四线混合有源电力滤波器有源部分最小容量分析

崔晓曦, 林智声, 蔡威曦, 黄民聪

(澳门大学科技学院, 澳门)

摘要: 在 $d-q-0$ 坐标系下建立了三相四线直流电容中分结构的单调谐式混合有源电力滤波器 (HAPF) 的数学模型。通过此数学模型, 对含中线电感与不含中线电感的单调谐式 HAPF 无源部分的滤波特性进行了分析和讨论。根据 HAPF 有源部分的容量分析并结合其无源部分的滤波特性, 优化了一般负载谐波电流情况下的三相四线单调谐式 HAPF 的结构, 并给出了其直流侧最小电压等级的表达式, 通过减小 HAPF 有源部分容量达到了降低 HAPF 成本的目的。最后, 通过仿真验证了最小电压等级理论的正确性及此优化结构的有效性。

关键词: 混合有源电力滤波器; $d-q-0$ 坐标系; 中线电感; 有源部分容量; 直流侧最小电压

0 引言

随着科学技术的发展, 含大量电力电子器件及非线性元件的一般性负载 (如单相及三相全桥整流电路、交直流转换器等) 已被广泛使用于电力系统中, 这使电能质量问题变得日益严重, 特别是无功功率和谐波电流对电力系统的污染问题。大量的谐波电流会导致设备过热、保险丝熔断、变压器过热、功率因数过低等问题, 这些问题会对电力系统造成不利影响, 并给电力用户造成损失^[1-3]。此外, 在三相四线系统中, $3k$ 次谐波电流, 特别是 3 次谐波电流会叠加在中线内, 其产生的寄生电压会影响变电站以及三相配电馈线附近的电磁水平, 过大的中线电流会导致中线过热, 从而破坏绝缘条件^[4]。

为了治理谐波电流, 在电力系统中加装无源电力滤波器 (PPF)、有源电力滤波器 (APF) 及混合有源电力滤波器 (HAPF) 成为一种有效的手段。PPF 成本低、结构简单, 但其体积庞大, 只可滤除固定次数的谐波电流, 且其滤波特性严重依赖于元件参数, 并会与系统产生共振, 造成谐波电流放大等问题^[5-6]。APF 拥有优良的滤波特性, 可更好地对谐波电流进行动态补偿, 但由于大功率电力电子器件的容量限制以及高昂的制造价格, 导致 APF 难以在大容量的情况下使用^[7-8]。

为了克服上述 PPF 及 APF 的缺点, 达到低成本、优补偿的效果, 研究人员将 PPF 与 APF 相结

合, 形成了新的 HAPF 拓扑结构^[9-11]。由 PPF 和 APF 相结合形成的 HAPF 具有多种拓扑结构, 大体上可分为 2 类: 一是 PPF 与 APF 串联; 二是 PPF 与 APF 并联。第 1 类 HAPF 拓扑结构因其简单方便且 APF 电压等级低于第 2 类拓扑结构, 在工业上得到大量运用, 本文的分析也基于 PPF 与 APF 串联的 HAPF 拓扑结构, 其中 PPF 采用无源元件最少的单调谐式 LC 串联耦合结构。

HAPF 不论在输电侧还是在配电侧都能够有效地降低有源部分容量。但由于配电侧的电压等级较低, 因此, HAPF 有源部分直流侧的电压等级也相应较低, 其在运行时所产生的开关噪声与开关损耗都较小。并且装载在配电侧的 HAPF 更靠近电能污染源, 能够实现就地补偿, 得到较好的补偿效果, 其市场潜力更为广泛。因此, 本文的研究主要基于 220 V 的电力系统。

文献[12]在正、负、零序背景下对含中线电感的电力滤波器拓扑结构进行了分析, 但缺乏有效的数学模型来反映电力滤波器的滤波特性。本文在 $d-q-0$ 坐标系下, 建立了在含中线电感与不含中线电感的三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 数学模型。通过模型, 本文讨论了上述 2 种 HAPF 无源部分在一般负载谐波电流情况下的滤波特性, 并对其各自有源部分的容量进行了分析。通过对两者有源部分所需最小容量的比较, 提出了含中线电感的三相四线单调谐式 HAPF 优化设计, 并给出了其直流侧最小电压等级。最后, 通过仿真验证了含中线电感的三相四线单调谐式 HAPF 的优越性及其补偿所需的直流侧最小电压等级。

收稿日期: 2011-07-18; 修回日期: 2012-07-10。

澳门特别行政区科学技术发展基金资助项目 (FDCT098/2005/A, FDCT015/2008/A1)。

1 三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 在 $d-q-0$ 坐标系下的模型

含中线电感的三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 如图 1 所示,其在 abc 坐标系下的平均大信号模型如图 2 所示。图中: v_{Sa}, v_{Sb}, v_{Sc} 为三相系统电压; $i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}, i_{Sn}$ 为三相及中线系统侧电流; $i_{loada}, i_{loadb}, i_{loadc}, i_{loadn}$ 为三相及中线负载侧电流; $i_{compa}, i_{compb}, i_{compc}, i_{compn}$ 为三相及中线补偿电流; v_{La}, v_{Lb}, v_{Lc} 为 HAPF 无源部分电感电压; v_{Ln} 为中线电感电压; v_{Ca}, v_{Cb}, v_{Cc} 为 HAPF 无源部分电容电压; d_a, d_b, d_c 为三相对中线的占空比。

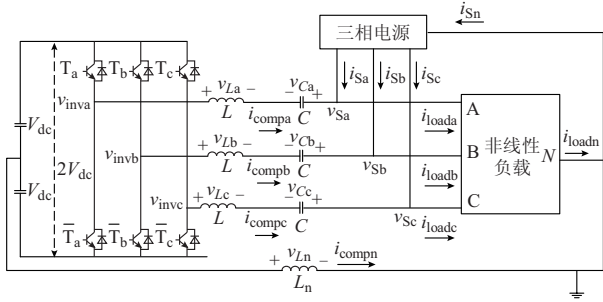


图 1 含中线电感的三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF

Fig.1 Single-tuned three-phase four-wire center-split HAPF with neutral line inductor

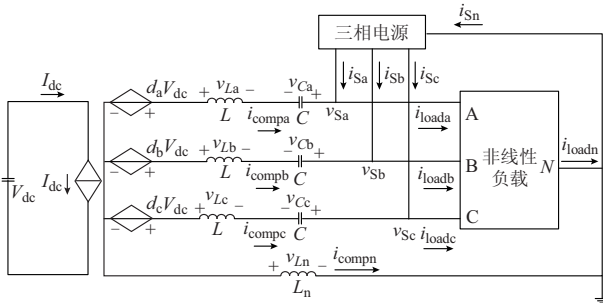


图 2 含中线电感的三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 在 abc 坐标系下的平均大信号模型

Fig.2 Average large-signal model for single-tuned three-phase four-wire center-split HAPF with neutral line inductor in abc coordinate

设 HAPF 有源部分的直流侧电压为理想电压 $2V_{dc}$ (如图 1 所示),则逆变器各相的输出电压 $v_{inva}, v_{invb}, v_{invc}$ 可以表示为:

$$\begin{bmatrix} v_{inva} \\ v_{invb} \\ v_{invc} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据基尔霍夫定律及电容、电感的微分方程,由图 2 可得系统方程为:

$$C \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{Ca} \\ v_{Cb} \\ v_{Cc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} i_{compa} \\ i_{compb} \\ i_{compc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{compa} \\ i_{compb} \\ i_{compc} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} + L_n \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{compn} \\ i_{compn} \\ i_{compn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Sa} \\ v_{Sb} \\ v_{Sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Ca} \\ v_{Cb} \\ v_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

将系统方程由 abc 映射到 $d-q-0$ 坐标系下,含中线电感的三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 在 $d-q-0$ 坐标系下的平均大信号数学模型可表示为:

$$\omega L \begin{bmatrix} -i_{compq} \\ i_{compd} \\ 0 \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{compd} \\ i_{compq} \\ i_{comp0} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \\ d_0 \end{bmatrix} - 3L_n \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{comp0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Sd} \\ v_{Sq} \\ v_{S0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Cd} \\ v_{Cq} \\ v_{C0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C \begin{bmatrix} -\omega v_{Cq} \\ \omega v_{Cd} \\ 0 \end{bmatrix} + C \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{Cd} \\ v_{Cq} \\ v_{C0} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} i_{compd} \\ i_{compq} \\ i_{comp0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

当 HAPF 不含中线电感时($L_n=0$),其在 $d-q-0$ 坐标系下的平均大信号数学模型可表示为:

$$\omega L \begin{bmatrix} -i_{Cq} \\ i_{Cd} \\ 0 \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Cd} \\ i_{Cq} \\ i_{C0} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \\ d_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Sd} \\ v_{Sq} \\ v_{S0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Cd} \\ v_{Cq} \\ v_{C0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C \begin{bmatrix} -\omega v_{Cq} \\ \omega v_{Cd} \\ 0 \end{bmatrix} + C \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{Cd} \\ v_{Cq} \\ v_{C0} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} i_{compd} \\ i_{compq} \\ i_{comp0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

比较式(4)和式(5)与式(6)和式(7)可知,中线电感不会影响 HAPF 在 $d-q-0$ 坐标下的平均大信号模型,因此,三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 在 $d-q-0$ 坐标系下的平均大信号模型如图 3 所示。

2 三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 有源部分的容量分析

在三相四线 HAPF 补偿系统中,当负载平衡时,以三相中的任意一相为例,其等效电路如图 4 所示。

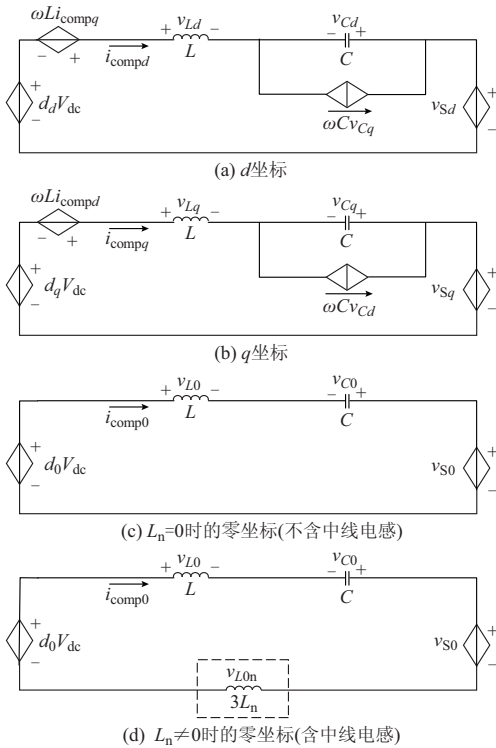


图3 三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 在 $d-q-0$ 坐标系下的平均大信号模型
Fig. 3 Average large-signal model for single-tuned three-phase four-wire center-split HAPF in $d-q-0$ coordinate

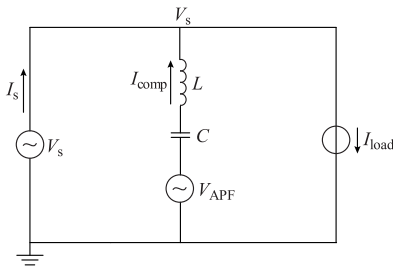


图4 HAPF 补偿系统单相等效电路
Fig. 4 HAPF single-phase equivalent model

由图 4 可知,单相 HAPF 有源部分容量 S_{APF} 为:

$$S_{APF} = V_{APF} I_{comp} \quad (8)$$

式中: I_{comp} 为补偿电流; V_{APF} 为 HAPF 有源部分的输出电压有效值。

由于补偿电流 I_{comp} 由负载决定,因此,当 HAPF 对负载进行补偿时,有

$$\begin{cases} I_{comp1q} = I_{load1q} \\ I_{compn} = I_{loadn} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_{load1q} 为负载基波无功电流; I_{comp1q} 为补偿的基波无功电流; I_{loadn} 为负载各次谐波电流。

因此, HAPF 有源部分的容量可通过 HAPF

有源部分的输出电压有效值 V_{APF} 来表征。

HAPF 有源部分的输出电压有效值 V_{APF} 可表示为:

$$V_{APF} = \sqrt{|V_{APF1}|^2 + \sum_{n=2}^{\infty} |V_{APFn}|^2} \quad (10)$$

式中: V_{APF1} 为有源部分输出的基波电压; V_{APFn} 为有源部分输出的第 n 次谐波电压。

由附录 A 可知,图 1 所示三相四线直流电容中分结构的 HAPF 的直流侧最小电压等级为:

$$V_{dc} = \sqrt{2} V_{APF} \quad (11)$$

在三相四线系统中,当含中线电感与不含中线电感的单调谐式 HAPF 对同一负载具有相同的补偿效果时,2 种 HAPF 的补偿电流相同,因此,含中线电感的单调谐式 HAPF 有源部分的容量 S_{APF-L} 与不含中线电感的单调谐式 HAPF 有源部分的容量 S_{APF-NL} 分别为:

$$S_{APF-L} = V_{APF-L} I_{comp} \quad (12)$$

$$S_{APF-NL} = V_{APF-NL} I_{comp} \quad (13)$$

式中: V_{APF-L} 和 V_{APF-NL} 分别为含中线电感的 HAPF 和不含中线电感的 HAPF 有源部分的输出电压有效值。

由式(10)可得:

$$V_{APF-L} = \sqrt{|V_{APF1-L}|^2 + \sum_{n=2}^{\infty} |V_{APFn-L}|^2} \quad (14)$$

$$V_{APF-NL} = \sqrt{|V_{APF1-NL}|^2 + \sum_{n=2}^{\infty} |V_{APFn-NL}|^2} \quad (15)$$

式中: V_{APF1-L} , V_{APFn-L} 和 $V_{APF1-NL}$, $V_{APFn-NL}$ 分别为含中线电感和不含中线电感的 HAPF 有源部分输出的基波电压和第 n 次谐波电压。

在基频下,含中线电感与不含中线电感的 HAPF 基频阻抗相等且输出的基波补偿电流相同,因此,由附录 A 可推出:

$$|V_{APF1-L}|^2 = |V_{APF1-NL}|^2 \quad (16)$$

当系统为不含中线电感的单调谐式 HAPF 时,由图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)可知,对于单相 HAPF 来说,在 k 次谐波电流下,其无源部分的等效阻抗 Z_{PFk} 为:

$$Z_{PFk} = j \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C} \right) \quad k = 1, 2, \dots, n; \omega = 2\pi f \quad (17)$$

由附录 A 可推出不含中线电感的单调谐式 HAPF 有源部分输出的各次谐波电压 $V_{APFn-NL}$ 为:

$$\sum_{n=2}^{\infty} V_{APFn-NL} = \sum_{k=2}^{\infty} \left| k\omega L - \frac{1}{k\omega C} \right| |I_{compk}| \quad (18)$$

当系统为含中线电感的单调谐式 HAPF 时,由图 3(a)、图 3(b)和图 3(d)可知,对于单相的 HAPF

系统,在 $3k \pm 1$ 次谐波电流下,其等效阻抗 $Z_{PF(3k \pm 1)}$ 为:

$$Z_{PF(3k \pm 1)} = j(3k \pm 1)\omega L + \frac{1}{j(3k \pm 1)\omega C} \quad (19)$$

在 $3k$ 次谐波电流下,其等效阻抗 Z_{PF3k} 为:

$$Z_{PF3k} = j3k\omega(L + 3L_n) + \frac{1}{j3k\omega C} \quad (20)$$

由附录 A 可推出含中线电感的单调谐式 HAPF 有源部分输出的各次谐波电压 V_{APFn-L} 为:

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{\infty} V_{APFn-L} = & \sum_{k=1}^{\infty} \left| (3k \pm 1)\omega L - \frac{1}{(3k \pm 1)\omega C} \right| |I_{\text{comp}(3k \pm 1)}| + \\ & \sum_{k=1}^{\infty} \left| 3k\omega(L + 3L_n) - \frac{1}{3k\omega C} \right| |I_{\text{comp}3k}| \quad (21) \end{aligned}$$

对于一般三相四线系统负载,如全桥整流电路,其谐波电流含量主要以 3 次、5 次、7 次及 9 次谐波为主,因此,本文仅考虑负载只含基波电流及 3 次、5 次、7 次、9 次谐波电流的情况,可得:

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{\infty} V_{APFn-NL} = & \left| 3\omega L - \frac{1}{3\omega C} \right| |I_{\text{comp}3}| + \\ & \left| 5\omega L - \frac{1}{5\omega C} \right| |I_{\text{comp}5}| + \\ & \left| 7\omega L - \frac{1}{7\omega C} \right| |I_{\text{comp}7}| + \\ & \left| 9\omega L - \frac{1}{9\omega C} \right| |I_{\text{comp}9}| \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{\infty} V_{APFn-L} = & \left| 3\omega(L + 3L_n) - \frac{1}{3\omega C} \right| |I_{\text{comp}3}| + \\ & \left| 5\omega L - \frac{1}{5\omega C} \right| |I_{\text{comp}5}| + \\ & \left| 7\omega L - \frac{1}{7\omega C} \right| |I_{\text{comp}7}| + \\ & \left| 9\omega(L + 3L_n) - \frac{1}{9\omega C} \right| |I_{\text{comp}9}| \quad (23) \end{aligned}$$

对比式(22)与式(23)可知:含中线电感与不含中线电感的 HAPF 在 $3k \pm 1$ 次谐波电流下的等效阻抗相等且只与 HAPF 的无源部分 LC 有关,但 2 种 HAPF 在 $3k$ 次谐波电流下的等效阻抗不相等。当单调谐式 HAPF 不含中线电感时,其 $3k$ 次谐波电流的等效阻抗也仅与 LC 有关;当单调谐式 HAPF 含有中线电感时,其 $3k$ 次谐波电流的等效阻抗与 HAPF 无源部分 LC 以及中线电感 L_n 有关。因此,在单调谐式 HAPF 不含中线电感时,通过谐调 LC,单调谐式 HAPF 只可构成一路谐波电流通路。当单调谐式 HAPF 含中线电感时,通过谐调 LC 以及 LC 与 L_n ,单调谐式 HAPF 可同时构成 2 路谐波电流通路。

以 LC 谐调于 5 次谐波、LC 与 L_n 谐调 3 次谐波为例,根据式(22)和式(23)可得:

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{\infty} V_{APFn-NL} = & \left| 3\omega L - \frac{1}{3\omega C} \right| |I_{\text{comp}3}| + \\ & \left| 7\omega L - \frac{1}{7\omega C} \right| |I_{\text{comp}7}| + \\ & \left| 9\omega L - \frac{1}{9\omega C} \right| |I_{\text{comp}9}| \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{\infty} V_{APFn-L} = & \left| 7\omega L - \frac{1}{7\omega C} \right| |I_{\text{comp}7}| + \\ & \left| 9\omega(L + 3L_n) - \frac{1}{9\omega C} \right| |I_{\text{comp}9}| \quad (25) \end{aligned}$$

对一般三相四线系统负载,9 次谐波电流 $I_{\text{comp}9}$ 远小于 3 次谐波电流 $I_{\text{comp}3}$,且 L_n 值很小,因此

$$\begin{cases} \sum_{n=2}^{\infty} V_{APFn-NL}^2 > \sum_{n=1}^{\infty} V_{APFn-L}^2 \\ S_{APF-NL} > S_{APF-L} \end{cases} \quad (26)$$

根据式(12)至式(26),设 R_s 为含中线电感与不含中线电感 HAPF 有源部分容量的比例,则有

$$R_s = \frac{S_{APF-L}}{S_{APF-NL}} = \frac{V_{dc-L}}{V_{dc-NL}} < 1 \quad (27)$$

由式(27)可知:在相同的三线四线负载谐波情况下,含中线电感 HAPF 有源部分的直流侧电压 V_{dc-L} 与不含中线电感 HAPF 有源部分的直流电压 V_{dc-NL} 之比 R_s 总小于 1。

在平衡三相四线负载谐波电流情况下,根据上述分析可直接计算出三相四线 HAPF 系统(含中线电感或不含中线电感)所需的最小直流侧电压,且使用含中线电感的单调谐式 HAPF 可减小 HAPF 有源部分的容量,但其要求 HAPF 的无源 LC 部分调谐在 $3k \pm 1$ 次谐波频率,因为添加的中线电感 L_n 与原 HAPF 无源部分 LC 只可构成 $3k$ 次谐波通道,若将单调谐式 HAPF 的无源 LC 部分设计为调谐于 $3k$ 次谐波频率,那么添加中线电感 L_n 将不会减少 HAPF 有源部分容量。虽然中线电感 L_n 使得 HAPF 使用的无源器件数目增加,但其能有效减小 HAPF 有源侧直流电压(即 HAPF 有源部分容量),从而达到降低 HAPF 成本的目的。

3 仿真结果

本文对含中线电感及不含中线电感的单调谐式 HAPF 在直流侧最小电压等级下的补偿特性进行了仿真,仿真软件为 MATLAB/Simulink。

本次仿真的非线性负载为桥式整流桥构成的三相平衡负载,所以三相补偿效果相同,本文取 A 相作为参考。A 相负载电流的波形及频谱如图 5 所

示,其中负载电流的有效值,基波无功电流及3次、5次、7次、9次谐波电流有效值分别为: $I_{rms} = 112\text{ A}$, $I_{L_{1q}} = 60.51\text{ A}$, $I_{L_3} = 25.42\text{ A}$, $I_{L_5} = 21.96\text{ A}$, $I_{L_7} = 2.18\text{ A}$, $I_{L_9} = 2.29\text{ A}$ 。

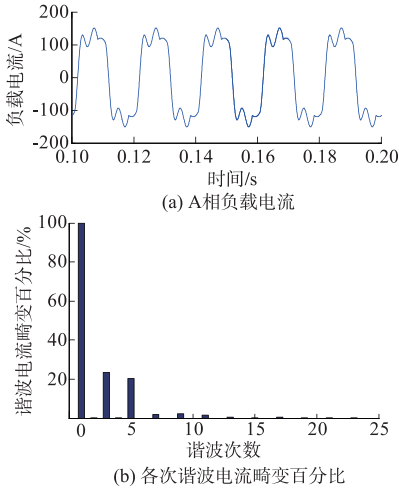


图5 A相负载电流波形及频谱分析

Fig. 5 Load current waveform and spectrum of phase A

由图5可知:A相的总谐波畸变(THD)百分比为31.24%,基波频率为50 Hz,其中以3次谐波电流及5次谐波电流的含量为主。根据第3节分析,含中线电感的单调谐式HAPF的无源部分将被设计成5次谐波的LC滤波器,而中线电感 L_n 和无源部分LC结合所构成的LC滤波器将被设计成3次谐波滤波器。本次仿真所取无源部分的电容 $C = 840\ \mu\text{F}$,由计算得: $L \approx 0.482\text{ mH}$, $L_n \approx 0.286\text{ mH}$ 。

在本次仿真中,系统电源电压有效值为 $V_s = 220\text{ V}$,且其逆变器的直流电容电压由理想电压源提供。根据上述分析及负载电流与系统元件参数,含中线电感与不含中线电感的单调谐式HAPF有源部分在不同频率电流下所计算出的输出电压有效值如表1所示。

表1 不同频率电流下HAPF有源部分的输出电压有效值
Table 1 Effective value of output voltage of HAPF active part in different current orders

HAPF结构	输出电压有效值/V				
	基波电流	3次谐波电流	5次谐波电流	7次谐波电流	9次谐波电流
$L_n = 0$	0.136	20.560	0.016	1.130	2.160
$L_n \neq 0$	0.136	0.005	0.016	1.130	7.740

由表1可求得: $V_{dc_NL} = 29.41\text{ V}$, $V_{dc_L} = 11.41\text{ V}$ 。因此,对于三相四线直流电容中分结构的单调谐式HAPF,不含中线电感与含中线电感的HAPF有源部分直流侧所需的最小总电压分别为:

$$\begin{cases} 2V_{dc} = 2V_{dc_NL} = 58.83\text{ V} \\ 2V_{dc} = 2V_{dc_L} = 22.82\text{ V} \end{cases} \quad (28)$$

根据式(28),取 $2V_{dc}$ 分别为25 V, 50 V, 75 V时对负载电流进行补偿。不含及含中线电感的单调谐HAPF的补偿效果见附录B图B1和图B2,其仿真结果见附录B表B1。由附录B的仿真结果及图6可以得出以下几点结论。

1)当单调谐式HAPF不含中线电感 L_n 时,HAPF只通过无源部分LC滤除5次谐波,且当直流侧电压为25 V时,HAPF直流侧电压远低于式(28)所计算的系统所需最小直流电压,因此,HAPF不能对系统进行有效补偿;当直流侧电压为50 V时,由于直流侧电压升高,使HAPF的补偿效果有所改善,但仍达不到系统所需的最小直流侧电压,因此,其补偿效果仍然不理想;当直流侧电压为75 V时,HAPF直流侧电压达到了系统所需的最小直流侧电压,因此,HAPF能达到良好的补偿效果。

2)当单调谐式HAPF含有中线电感 L_n 时,HAPF可通过无源部分LC有效地滤除5次谐波,同时亦与中线电感 L_n 相结合从而滤除3次谐波电流,因此,含中线电感的单调谐式HAPF有源部分直流侧电压仅需25 V便有良好的补偿效果(直流侧电压为75 V时,直流侧所增加的电压会带来高频噪声,从而影响HAPF的补偿效果)。由于有源部分直流侧电压等级直接反映了HAPF有源部分容量,因此,通过仿真可知,在一般三相四线平衡负载谐波电流情况下,含中线电感的单调谐式HAPF所需的有源部分容量较小。

4 HAPF在负载不平衡时所需最小直流电压的考虑

以上通过平衡负载的仿真证明了HAPF有源部分最小直流侧电压计算的正确性。对于不平衡负载,除 $3k$ 次谐波电流外,其他各次不平衡电流也会在中线中流过,因此,在不平衡负载情况下,精确计算出HAPF有源部分所需的最小直流电压较为复杂,但可根据式(14)、式(15)及HAPF的三相输出基波电压与各次谐波电压推出在不平衡负载条件下含中线电感与不含中线电感的HAPF所需最小直流侧电压近似表达式为:

$$V_{APF_L} = \sqrt{|V_{APF_{L_avg}}|^2 + \sum_{n=2}^{\infty} |V_{APF_{n_L_avg}}|^2 + \sum_{n=1}^{\infty} |V_{APF_{n_L_unb}}|^2} \quad (29)$$

$$V_{APF_NL} = \sqrt{|V_{APF_{NL_avg}}|^2 + \sum_{n=2}^{\infty} |V_{APF_{n_NL_avg}}|^2 + \sum_{n=1}^{\infty} |V_{APF_{n_NL_unb}}|^2} \quad (30)$$

式中: $V_{APFf_{L_avg}}$ 和 $V_{APFf_{NL_avg}}$ 分别为 HAPF 有源部分三相所需的基波电压平均值; $V_{APFf_{n_L_avg}}$ 和 $V_{APFf_{n_NL_avg}}$ 为 HAPF 有源部分三相所需的第 n 次谐波电压平均值; $V_{APFf_{n_L_umb}}$ 和 $V_{APFf_{n_NL_umb}}$ 分别为 HAPF 有源部分三相所需基波电压及第 n 次谐波电压与各自平均值的最大差值。

在式(29)中,当负载平衡时,HAPF 有源部分三相输出的基波电压及各次谐波电压都分别相等,因此, $V_{APFf_{n_L_umb}}=V_{APFf_{n_NL_umb}}=0$,其等效于式(14)和式(15)。但不论在平衡或不平衡负载条件下,三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 在 $d-q-0$ 坐标系下的平均大信号模型都是不变的,因此,即使负载是不平衡的,当 HAPF 含有中线电感时,HAPF 仍可提供 2 条不同的谐波电流通路,从而有效滤除 2 次不同频率的谐波电流,所以含中线电感的 HAPF 所需的最小直流侧电压也会较不含中线电感的 HAPF 所需的最小直流侧电压低。

5 配电网中的 APF 与优化设计 HAPF 比较

在传统的三相四线配电网中(电网相电压为 220 V),APF 因其结构的原因,需要采用耐压较高的电力电子器件,如耐压为 1 200 V 或 1 600 V 的绝缘栅双极型晶体管(IGBT),但通过使用 HAPF 以及对其进行优化,在电流不变的情况下,HAPF 有源部分的电力电子器件可采用较低耐压的电力电子器件,如金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)或者低耐压的 IGBT。以 IXYS 公司的产品为例,150~200 A 限流电力电子器件所组成的有源逆变器的价格见附录 C。

当限流变化不大时(150~200 A),采用低耐压电力电子器件可有效减少有源逆变器的造价,从而降低电力系统补偿器成本。对比传统的 APF 和经优化的 HAPF,传统的 APF 需选择 1 200~1 600 V 限压的 IGBT 元件,而优化的 HAPF 只需选择 100~200 V 限压的 MOSFET 元件或 600 V 的 IGBT 元件,因此,经优化的 HAPF 有源部分较传统 APF 有源部分造价最大可降低约 50%,同时,由于三桥臂耦合电容的价格也较为低廉,且添加的中线电感值较小,价格也相对便宜,因此,经优化的 HAPF 的初始造价较传统的 APF 更为廉价。

系统成本除考虑初始成本外,还应考虑运行成本,本文在三相四线系统下,通过添加中线电感,有效地降低了 HAPF 有源部分的电压等级(由 90 V 降低到 45 V,约为原来电压等级的 50%),当系统运行在低电压等级时,其产生的损耗较小,噪声也较小,而且也更为安全,系统元件的寿命也会更长。因

此,当系统运行一段时间后,通过优化设计的 HAPF 能更好地体现其经济效益。所以,对于配电网中的电力补偿器来说,在同样的补偿效果下,采用优化设计的 HAPF 比采用传统 APF 具有更高的性价比。

6 结语

本文在 $d-q-0$ 坐标系下建立了三相四线直流电容中分结构的单调谐式 HAPF 的数学模型。通过对不含中线电感与含中线电感的三相四线单调谐式 HAPF 有源部分容量进行分析,得到了负载平衡条件下三相四线单调谐式 HAPF 直流侧电压的表达式,且通过仿真验证了其正确性。此外,通过负载不平衡条件下 HAPF 最小直流侧电压的分析可知:不论负载是否平衡,含中线电感的 HAPF 所需的最小直流侧电压也会较不含中线电感的 HAPF 所需的最小直流侧电压低。因此,含中线电感的单调谐式 HAPF 可有效地减小有源侧容量,从而达到降低 HAPF 成本的目的。

感谢澳门大学研究委员会提供经济资助。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 乐健,姜齐荣,韩英铎. 三相四线并联 APF 的电流滞环控制策略分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(17):70-75.
LE Jian, JIANG Qirong, HAN Yingduo. Analysis of hysteresis current control strategy of three-phase four-wire shunt APF[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 70-75.
- [2] 王轩,姜新建,朱东起. 治理三相四线制配电网谐波电流的新技术[J]. 电力系统自动化,2004,28(15):44-46.
WANG Xuan, JIANG Xinjian, ZHU Dongqi. New technology for mitigating harmonic current in three-phase four-wire electric distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 44-46.
- [3] VARSCHAVSKY A, DIXON J, ROTELLA M, et al. Cascaded nine-level inverter for hybrid-series active power filter, using industrial controller [J]. IEEE Trans on Industrial Application, 2010, 57(8): 2761-2767.
- [4] ZADEH J K, FARJAH E. New control technique for compensation of neutral current harmonics in three-phase four-wire systems[C]// Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech, June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania.
- [5] FUJITA H, YAMASAKI T, AKAGI H. A hybrid active filters for damping of harmonic resonance in industrial power system [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(2): 215-222.
- [6] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制与无功补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

- [7] PENG F Z, AKAGI H, NABAE A. A new approach to harmonic compensation in power systems—a combined system of shunt passive and series active filters[J]. IEEE Trans on Industrial Application, 1990, 26(6): 983-990.
- [8] RIVAS D, MORAN L, DIXON J W, et al. Improving passive filter compensation performance with active techniques [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003, 50(1): 161-170.
- [9] SINGH B, AL-HADDAD K, CHANDRA A. A review of active filters for power quality improvement[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 960-971.
- [10] 肖湘宁, 徐永海, 刘昊. 混合型有源电力补偿技术与实验研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 39-44.
XIAO Xiangning, XU Yonghai, LIU Hao. Analysis of hybrid power compensator and its experimental study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 39-44.
- [11] RAHMANI S, AL-HADDAD K A, FNAIECH F. A new control technique based on the instantaneous active current

applied to shunt hybrid power filters[C]// Proceedings of the 34th IEEE Annual Power Electronics Specialist Conference, June 15-19, 2003, New York, NY, USA: 808-813.

- [12] RODRIGUEZ P, CANDELA J I, LUNA A, et al. Current harmonics cancellation in three-phase four-wire systems by using a four-branch star filtering topology[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(8): 1939-1950.

崔晓曦(1984—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 电能质量补偿。E-mail: sunstarcxx@msn.com

林智声(1980—), 男, 博士, 主要研究方向: 电能质量补偿。

蔡威曦(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电能质量补偿。

(编辑 孔丽蓓)

Active Part Minimum Capacity Analysis of Three-phase Four-wire Hybrid Active Power Filters

CUI Xiaoxi, LAM Chiseng, CHOI Waihei, WONG Manchung

(Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau, China)

Abstract: This paper establishes a mathematical model of three-phase four-wire center-split single-turned hybrid active power filters (HAPF) in d - q -0 coordinate. Based on this mathematical model, the filtering characteristics of the passive part of the single-tuned HAPF with and without neutral inductor are analyzed and discussed. According to the HAPF active part capacity analysis and the filtering characteristics of its passive part, the structure of the three-phase four-wire single-turned HAPF can be optimized and its minimum DC-link voltage expression can be deduced based on the general harmonic current contents of the loading. Therefore, the cost of the HAPF can be lowered by reducing its active part capacity. Finally, the correctness of the minimum DC-link voltage theory and the effectiveness of this optimized structure are verified by simulation.

This work is supported by Science and Technology Development Fund of Macau SAR (No. FDCT098/2005/A, No. FDCT015/2008/A1).

Key words: hybrid active power filters (HAPF); d - q -0 coordinate; neutral inductor; capacity of active part; minimum DC-link voltage

附录 A HAPF 最小直流侧电压推导

当系统电压 V_s 为纯正弦基波信号时，单相 HAPF 有源部分输出的基波电压 V_{APFf} 可表示为：

$$V_{APFf} = V_s + Z_{PFf} \cdot I_{\text{comp}f} \quad (\text{A1})$$

式中：下标“ f ”表示基频分量； Z_{PFf} 为无源部分基波阻抗。因负载多为感性电抗，因此，HAPF 在设计时，无源部分的电容 C 的基波等效阻抗远大于无源部分的电感 L 的基波等效阻抗，因此，HAPF 无源部分呈容性阻抗，所以

$$Z_{PFf} = |Z_{PFf}| e^{jff} \quad (ff = -90^\circ) \quad (\text{A2})$$

当 HAPF 工作在理想状态下时，基波补偿电流 $I_{\text{comp}f}$ 中只含无功电流分量 $I_{\text{comp}f}^q$ 而不含有功电流分量 $I_{\text{comp}f}^p$ ，因此

$$V_{APFf} = V_s - |X_{Lf} - X_{Cf}| |I_{\text{comp}f}^q| \quad (\text{A3})$$

同理，单相 HAPF 有源部分输出的各次谐波电压 V_{APFn} 可表示为：

$$V_{APFn} = |X_{Ln} - X_{Cn}| |I_{\text{comp}n}| \quad (\text{A4})$$

式中：下标“ n ”表示谐波分量，因此

$$\sum_{n=2}^{\infty} |V_{APFn}|^2 = (|X_{L2} - X_{C2}| |I_{\text{comp}2}|)^2 + (|X_{L3} - X_{C3}| |I_{\text{comp}3}|)^2 + \dots + (|X_{Ln} - X_{Cn}| |I_{\text{comp}n}|)^2 \quad (\text{A5})$$

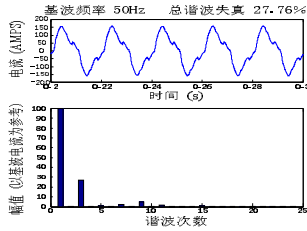
当确定了 HAPF 有源部分的输出电压 V_{APF} 时，单相 HAPF 系统的最小直流侧电压 V_{dc_HAPF} 可表示为：

$$\sqrt{2}V_{APF} = mV_{dc_HAPF} \quad (m \leq 1) \quad (\text{A6})$$

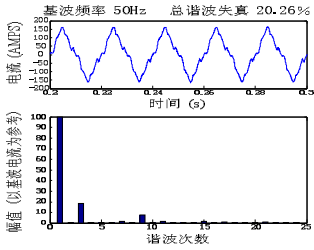
式中： m 为调制指数。由式(A6)可以看出，HAPF 的直流侧电压同样可以用来表征 HAPF 有源部分的容量，在相同的补偿电流情况下，直流侧电压与 HAPF 有源部分所需的容量成正比，因此，HAPF 补偿所需的直流侧最小电压可由式 (A7) 确定。

$$V_{dc_HAPF} = \sqrt{2}V_{APF} \quad (\text{A7})$$

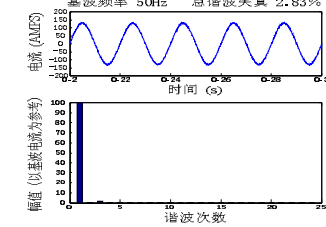
附录 B



(a) $2V_{dc}=25\text{ V}$ 的补偿效果



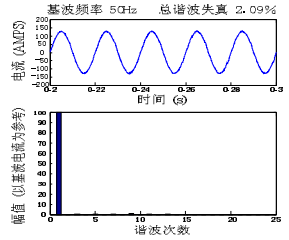
(c) $2V_{dc}=50\text{ V}$ 的补偿效果



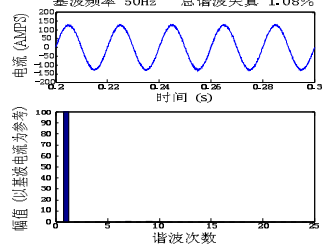
(e) $2V_{dc}=75\text{ V}$ 的补偿效果

图 B1 电源电流补偿后波形及频谱($L_n=0$)

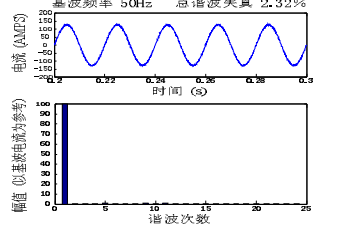
Fig.B1 Source current waveform and spectrum after compensation ($L_n=0$)



(b) $2V_{dc}=25\text{ V}$ 的补偿效果



(d) $2V_{dc}=50\text{ V}$ 的补偿效果



(f) $2V_{dc}=75\text{ V}$ 的补偿效果

图 B2 电源电流补偿后波形及频谱($L_n=286\text{ mH}$)

Fig.B2 Source current waveform and spectrum after compensation ($L_n=286\text{ mH}$)

表 B1 仿真结果
Table B1 Simulation results

	直流电容电压 $2V_{dc}/\text{V}$	3 次谐波电流/%	5 次谐波电流/%	总谐波电流失真/%
负载电流	--	23.50	20.3	31.24
电源电流($L_n=0$)	25	27.10	1.27	27.76
	50	18.53	0.55	20.26
	75	1.63	0.25	2.83
电源电流($L_n\neq 0$)	25	0.47	0.71	2.09
	50	0.09	0.34	1.08
	75	0.1	0.24	2.32

附录 C

表 C1 IXYS 公司电力电子器件价格
Table C1 Price of IXYS power electronic devices

种类	型号	限压 /V	限流 /A	价格/美元 (6 个开关元件)
MOSFET	IXFN200N10P	100	200	127.920
	IXFN180N15P	150	150	127.920
IGBT	IXGN120N60A3D1	600	200	163.500
	IXDN75N120	1200	150	249.300
	IXGN100N160A	1600	200	241.572