

有源电力滤波器并列运行方案

吉 平,戴朝波,武守远

(中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:在某些实际工业生产中,为保证供电可靠性会采用经闭合母联断路器连接的 2 条母线向非线性负载供电的结构。采用无源滤波器治理谐波时,谐波电流会在母联断路器和各支路间流动。针对该运行工况,提出了有源电力滤波器(APF)并列运行的谐波治理方案。详细分析了谐波穿行现象产生的原因以及 APF 并列运行抑制谐波穿行的原理;通过 PSCAD/EMTDC 软件仿真对分布式无源滤波方案和 APF 并列滤波方案的滤波效果进行了比较,对负载扰动、无源滤波支路投退等运行工况进行仿真分析。结果表明:APF 并列运行的谐波治理方案能有效解决分布式无源滤波方案中存在的谐波电流吸收率低、谐波电流穿行、滤波支路易过载、电能质量较差等问题,具有较强的实用价值。

关键词:有源电力滤波器;并列运行;谐波穿行;无源滤波器;电能质量

中图分类号: TN 713; TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0012-07

0 引言

非线性负载和电力电子设备的广泛应用向电网注入大量谐波电流和无功电流,对电力系统的安全运行构成威胁^[1-7]。目前,谐波治理措施主要有无源滤波器 PF(Passive Filter)、有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)和混合型滤波器 HAPF(Hybrid Active Power Filter)^[8-10]。

APF 按照拓扑结构可分为单独使用的 APF 和 HAPF^[9]。其中,单独使用的 APF 按连接方式分为并联型 APF 和串联型 APF;HAPF 按与 APF 混合对象的不同分为与 PF 混合,也称电力线路功率调节器 APLC(Active Power Line Conditioner),以及与其他换流器混合 2 种方式^[8]。与 PF 混合的 HAPF 包括 4 种结构:并联型 APF+并联型 PF;注入型 APF(包括串联谐振注入型 APF 和并联谐振注入型 APF);串联型 APF+并联型 PF;APF 与 PF 串联后接入电网。与其他变流器混合的 HAPF 也有 4 种结构:并联型 APF+串联型 APF;多重化逆变器+PWM 逆变器;低频+高频 PWM 逆变器;注入型 APF+低频 PWM 逆变器。

PF 由于结构简单、经济方便、技术成熟、运行维护简单等优点在国内外均得到广泛的应用。系统参数未知或系统谐波参数变化,PF 有时仍会发生谐振事故。APF 能动态补偿谐波、无功和负序,不会发生谐振问题,且 APF 所占空间小,投资持续下降,因此逐渐得到广泛应用^[4-5]。

单独运行的并联型和串联型 APF 由于存在有源装置容量大、开关器件要求高、造价高、运行效率低等缺点而在工程应用中受到一定限制。与 PF 混合

的 HAPF 综合了 PF 与 APF 的优点,降低了有源装置容量,改善了滤波性能,提高了经济性,但也存在一些缺点^[8-9]:

a. 并联 APF+并联 PF 混合方案,APF 注入的谐波电流可能流入 PF 和电力系统中,且开关器件的耐压没有降低;

b. 注入型 APF 利用 LC 谐振使逆变器不承受基波电压,可抑制节点谐波电压,但受到补偿电流确定、补偿节点优选、在线谐波检测等技术难点的制约,目前还处于研究和试验阶段;

c. 串联 APF+并联 PF 混合方案,PF 不能滤除的谐波分量将会被 APF 强制流入 PF,从而在负载端产生相应的谐波电压,同时因串联 APF 的绝缘要求比较高、维修不便等而在实际工程中受到很大限制;

d. APF 与 PF 串联后再与电网并联的方案较适用于高电压系统,但结构复杂,不适于非特征谐波源补偿,无功补偿容量较小,且运行特性受控制策略影响较大。

APF 容量随补偿容量的增加而增加,因此,实际应用中通常采用 APF 并联来提供更大的补偿电流,这样,控制会相对复杂,稳定性和可靠性会略有降低^[9]。

在某些生产系统中,生产企业为保证供电可靠性而采用了通过母联断路器连接的 2 条母线分别向非线性负载供电的电路结构,并要求母联断路器合闸运行。在这一运行结构下,当负载投退或 PF 的滤波支路投退时,由非线性负载产生的谐波电流就会通过闭合的母联断路器产生大范围的流动,对系统安全运行构成威胁。

鉴于谐波电流的分配由电路各支路的谐波阻抗决定,对于通过母联断路器连接的 2 条母线分别对非线性负载供电的这一工况,本文针对性地提出了

APF 并列运行的谐波治理方案。首先,详细分析了谐波穿行现象产生的原因以及 APF 并列运行抑制谐波穿行的原理;接着通过 PSCAD/EMTDC 软件仿真对分布式无源滤波方案和 APF 并列滤波方案的滤波效果进行了比较,之后,对负载扰动、无源滤波支路投退等运行工况进行仿真分析。仿真分析结果表明:APF 并列运行的谐波治理方案能有效解决分布式无源滤波方案中存在的谐波电流穿行、谐波电流吸收率低、谐波电流超标、滤波支路易过载、电能质量较差等一系列问题。

1 实际工程案例

目前,国内单晶炉加热器系统电源大多采用直流供电,通常采用三相干式变压器经三相晶闸管桥式整流电路将交流电整流为直流电。当单晶炉冶炼并拉制出单晶棒时,会产生大量的谐波电流,且谐波含量与晶闸管的导通角相关,即谐波含量随融料所需功率的增加而增大^[6]。有测试结果表明:单晶炉的谐波电流主要为 5、7、11 次谐波,各次谐波电流总畸变率可达 23%~35%,谐波电压总畸变率约为 5%~7%,功率因数只有 0.55 左右^[6]。

1.1 系统简介

图 1 是某单晶硅生产企业的供电系统主接线图,由 10 kV 进线提供电源。1 号、2 号、3 号和 4 号变压器的高压侧并联接 10 kV 母线,其中,1 号和 2 号变压器并列运行,3 号和 4 号变压器并列运行,1 号母联和 2 号母联处于合闸状态。400 V I 段和 II 段母线所带负荷为 20 台单晶炉,每台单晶炉配有一套无源滤波补偿装置。400 V III 段和 IV 段母线所带负荷为 20 台单晶炉,每台单晶炉配有一套无源滤波补偿装置,并带有 500 kW 的不间断电源(UPS)。

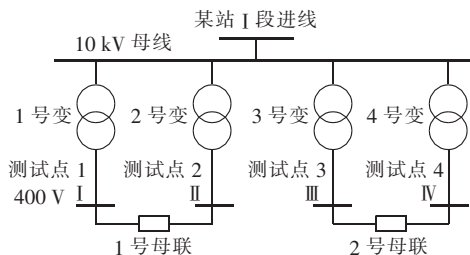


图 1 某生产系统的供电主接线图

Fig.1 Main connection diagram of one industrial power supply system

1.2 系统中存在的电能质量问题

图 2 给出了 1 号变压器低压侧母线总进线的电流测试波形。通过电能质量测试仪测得电压总畸变率为 2.435%,3 次、5 次、7 次谐波电压含有率分别为 0.4462%、1.723%、0.1936%,3 次、5 次、7 次、11 次谐波电流分别为 65.4 A、136.0 A、9.176 A、16.58 A。

另外,通过综合自动化后台看到:流经母联的 5 次谐波电流在某些时刻会超过 300 A,流经支路的 5 次谐波电流会超过 200 A,且伴随各台单晶炉运行状

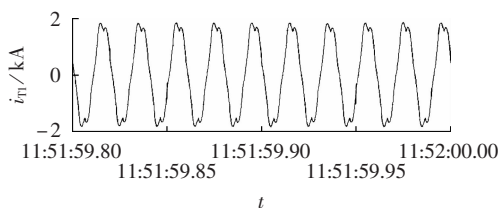


图 2 1 号变压器低压侧电流测试波形

Fig.2 Tested current waveform of transformer 1

态的变化而变化,而流经母联的基波电流一般不超过 100 A。

从上述测试结果可知,该系统中有数值较大的谐波电流在低压母联和各支路间流动,且数值不断变动,构成系统安全运行的一大隐患。而且,所采用的分布式无源滤波方案谐波电流吸收率低、谐波电流超标,供电系统电能质量较差。

2 谐波穿行产生原因分析

2.1 谐波通过母联断路器的穿行

为简化分析,仅对图 1 中 I 段和 II 段构成的并列运行网络进行分析,示意图如图 3 所示。为分析方便,仅考虑母线 I 段带非线性负载,此时,简化等效电路如图 4 所示。图 4 中,电源分别为 U_{S1} 、 U_{S2} ,相应等效阻抗分别为 Z_{S1} 、 Z_{S2} ;两端并列运行滤波器的等效阻抗分别为 Z_{F1} 、 Z_{F2} ;联络线等效阻抗为 Z_L ;I 段非线性负载等效为谐波电流源 I_{Lh} ;注入 U_{S1} 、 U_{S2} 、 Z_{F1} 、 Z_{F2} 、 Z_L 的谐波电流分别为 I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_{F1} 、 I_{F2} 、 I_L 。需要强调的是,当 $Z_L \approx 0$ 时,并列运行的两滤波器近似等效为并联在同一条母线上,但仍有别于本文引言中所述为增加 APF 补偿容量而采用的并联运行方式。

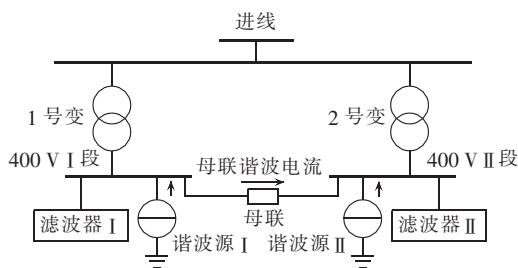


图 3 并列运行供电网络示意图

Fig.3 Schematic diagram of power system in parallel operation

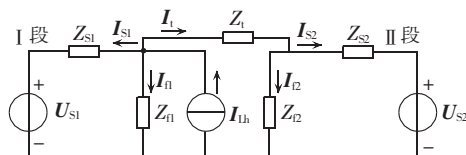


图 4 并列运行系统单相等效电路图

Fig.4 Equivalent single-phase circuit of power system in parallel operation

假定电压源无谐波电压,根据基尔霍夫电压定律、电流定律和叠加原理,可求得图 4 中 I 段各支路谐波电流的表达式:

$$\begin{aligned}
I_{S1} &= Z_{\Sigma} I_{Lh} / Z_{S1}, \quad I_{f1} = Z_{\Sigma} I_{Lh} / Z_{f1} \\
I_t &= Z_{\Sigma} I_{Lh} / [Z_t + (Z_{f2} // Z_{S2})] \\
Z_{\Sigma} &= \left(\frac{1}{Z_{S1}} + \frac{1}{Z_{f1}} + \frac{1}{Z_t + (Z_{f2} // Z_{S2})} \right)^{-1}
\end{aligned} \quad (1)$$

由式(1)可知,在系统参数确定时,谐波电流的分配与各支路的谐波阻抗相关,即有如下关系:

$$\begin{aligned}
I_{f1} &\propto I_{Lh} / Z_{f1}, \quad I_{S1} \propto I_{Lh} / Z_{S1} \\
\Delta I_{f1} &\propto \Delta I_{Lh} / Z_{f1}, \quad \Delta I_{S1} \propto \Delta I_{Lh} / Z_{S1}
\end{aligned} \quad (2)$$

其中, ΔI_{Lh} 、 ΔI_{S1} 、 ΔI_{f1} 分别为谐波源电流变化量、流过电源 I 的谐波电流变化量和滤波支路谐波电流的变化量。

由式(1)(2)可知,各支路谐波电流值与其等效阻抗成反比,即谐波电流的分配由各支路的谐波阻抗决定。当非线性负载产生的谐波电流变化时,流过电源、母联以及滤波器支路的谐波电流将会按谐波阻抗重新分配。

2.2 谐波在 PF 支路间的穿行

以图 3 供电网络中 I 段为例,加装图 5 结构的 PF,其简化单相等效电路如图 6 所示。其中,PF 的 3 条滤波支路的等效阻抗分别为 Z_{f1} 、 Z_{f2} 、 Z_{f3} ,电源电压为 U_s ,电源等效阻抗为 Z_s ,非线性负载等效为一谐波电流源 I_{Lh} 。

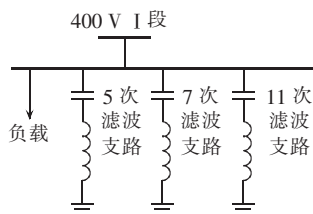


图 5 无源滤波器结构示意图

Fig.5 Structure of PFs

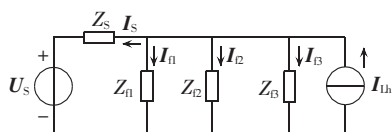


图 6 加装无源滤波器的系统单相等效电路图

Fig.6 Equivalent single-phase circuit with PFs

假定电压源无谐波电压,根据基尔霍夫电压、电流定律可求得注入电源的谐波电流 I_s 和滤波器各支路的谐波电流 $I_{fi}(i=1,2,3)$,如式(3)所示:

$$\begin{aligned}
I_s &= \frac{1}{Z_s} \left(\frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{Z_{fi}} \right)^{-1} I_{Lh} \\
I_{fi} &= \frac{1}{Z_{fi}} \left(\frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{Z_{fi}} \right)^{-1} I_{Lh}
\end{aligned} \quad (3)$$

在系统参数确定的情况下,流过滤波支路的谐波电流 I_{fi} 与支路谐波阻抗有如下关系:

$$\begin{aligned}
I_{fi} &\propto I_{Lh} / Z_{fi}, \quad \Delta I_{fi} \propto \Delta I_{Lh} / Z_{fi} \\
I_s &\propto I_{Lh} / Z_s, \quad \Delta I_s \propto \Delta I_{Lh} / Z_s
\end{aligned} \quad (4)$$

其中, $i=1,2,3$; ΔI_{Lh} 、 ΔI_s 、 ΔI_{fi} 分别为谐波电流源变化量、注入电源谐波电流变化量和滤波支路谐波电流

的变化量。

分布式无源滤波方案的谐波电流吸收率较低,电能质量改善有限。由于制造技术的原因,分布式无源滤波方案中各滤波支路的谐振点和谐振阻抗会有差异,而从式(3)(4)可知谐波电流的分配由各支路的谐波阻抗决定,所以有的滤波支路流过的谐波电流会偏小,有的滤波支路流过的电流会过大,从而容易诱发滤波支路的过载问题。如果过载时间较长,将会导致滤波器逐步损坏,如电容器容量下降、谐振点偏移等,进而引发其他滤波支路损坏。采用机械式自动投切 PF 极大缩短了设备的使用寿命,而且多个滤波器自动投运时,系统的谐振点偏多,在某些特殊的运行工况下,会产生谐波放大甚至引发谐振。

从式(3)(4)可知,当非线性负载突变(I_{Lh} 变化)或者滤波支路投退(Z_{fi} 变化)时,谐波电流会根据各支路的谐波阻抗重新分配。如果某滤波支路的投退对谐波阻抗的影响比较大,则谐波电流的调整量也会比较大。对图 3 所示并列运行的系统,谐波电流的重新分配会导致母联和各支路上有大量谐波电流流动,且幅值不断变化,即产生谐波穿行现象。这种谐波电流的大范围流动,加大了系统谐波损耗,容易诱发保护、通信等自动化设备的误动、拒动或故障,对系统安全运行构成威胁。

3 APF 并列运行的谐波治理方案

3.1 APF 的并列运行

为了克服分布式无源滤波方案的缺点,本文提出了采用 APF 并列运行的谐波治理方案,其原理如图 7 所示。图 7 中,在 400 V I 段和 II 段母线上分别并联 APF I 和 APF II,此时 2 个 APF 处于并列运行状态。其简化等效电路如图 8 所示。

图 8 中, U_{S1} 、 U_{S2} 为电源,相应等效阻抗分别为 Z_{S1} 、 Z_{S2} ;联络线等效阻抗为 Z_t ; I 段、II 段非线性负载等效为谐波电流源 I_{Lh1} 和 I_{Lh2} ;并列运行的 APF 分别等效为受控电流源 I_{f1} 和 I_{f2} ;注入 U_{S1} 、 U_{S2} 、 Z_t 的谐波电流分别为 I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_t 。其中, $I_{f1}=I_{Lh1}$, $I_{f2}=I_{Lh2}$ (参考方向如图 8 所示),显然在理想情况下谐波电流 I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_t 均为零,而且有式(5)成立。

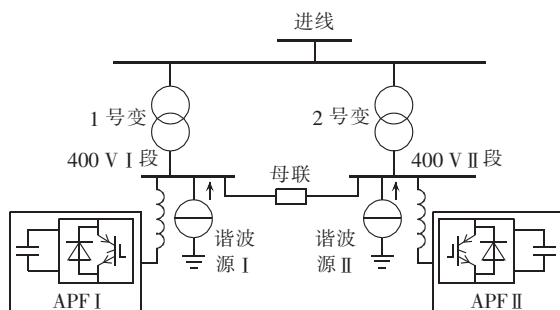


图 7 并列运行 APF 滤波方案示意图

Fig.7 Schematic diagram of harmonic suppression scheme with APFs in parallel operation

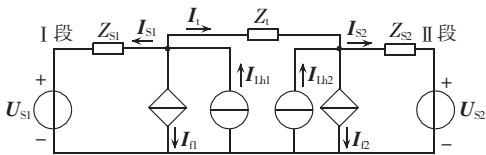


图 8 并列运行 APF 滤波方案等效电路图

Fig.8 Equivalent circuit of harmonic suppression scheme with APFs in parallel operation

$$\Delta I_{fi} = \Delta I_{1hi} \quad (5)$$

其中, $i=1,2$; ΔI_{1hi} 、 ΔI_{fi} 分别为谐波电流源变化量和 APF 补偿电流的变化量。

显然,根据基尔霍夫电压、电流定律可得:

$$\Delta I_{Si} = 0, \quad \Delta I_i = 0 \quad (6)$$

其中, $i=1,2$; ΔI_{Si} 为注入电源谐波电流变化量, ΔI_i 为联络线谐波电流变化量。

由上述分析可知,采用 APF 并列运行方案进行谐波治理可以有效解决分布式无源滤波方案中存在的谐波电流穿行、滤波支路易过载等问题。而且由于 APF 可以高效地补偿谐波电流,大幅提高了电网谐波吸收率,改善了电能质量。

3.2 APF 谐波检测环节输入信号的选取

APF 谐波检测环节将测量测得的负载电流经过预处理、采样保持、A/D 转换和检测算法处理等环节得到 APF 需要提供补偿电流的参考值,是 APF 的关键环节之一^[11]。对于有多条馈线的情况,可对各条馈线的负载电流进行相加从而得到总的负载电流,这就需要在各条馈线上加装传感器,有些馈线距离较远,实现时会有诸多不便。本文仅测量 400 V 进线和联络线上(母联)的电流,从二者差值中获得总的负载电流作为 APF 谐波检测环节的输入量,这样既减少了传感器的数量和信号的数量,也方便实际工程的实施。

3.3 APF 控制方案

3.3.1 APF 补偿电流控制环节

补偿电流的跟踪控制采用图 9 所示的单极性三角载波线性控制方法^[12]。其中, I_{ref} 为指令电流, I_{gen} 为 APF 产生的补偿电流, I_{err} 为 I_{ref} 和 I_{gen} 的差值, I_{err} 经过 PI 环节与高频三角载波 U_{tri} 相比较产生开关器件所要求的开关信号。

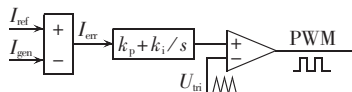


图 9 三角载波控制框图

Fig.9 Block diagram of triangular carrier control

3.3.2 APF 直流侧电容电压控制

根据文献[13-16]的研究成果合理选取了直流侧电容值和电容电压参考值;基于 APF 交直流侧瞬时功率平衡原理^[17-19],建立了 APF 直流侧电压闭环动态数学模型,求得 APF 有功电流的幅值;最后根据锁相环原理^[20-24]得到 APF 有功电流的相位,从而有效控制了直流侧电容电压,最终保证

APF 动态性能。

4 仿真分析与试验结果

以图 3 所示供电系统为例,采用 PSCAD/EMTDC 进行仿真分析,该系统简化等效电路的单线图如图 10 所示,其中, I 侧负载为负载 11 和负载 12, II 侧负载为负载 21 和负载 22,所有负载采用电容滤波不可控整流电路。不加装滤波器时的谐波分布如表 1 所示。APF 并列运行补偿方案为在图 10 中①② 2 处加装 APF,分布式无源滤波方案为在③~⑥ 4 个点加装 PF。

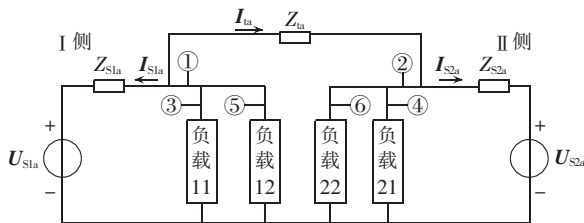


图 10 PSCAD/EMTDC 仿真电路单线图

Fig.10 Single-line simulation circuit of PSCAD/EMTDC

不加滤波器时的谐波电流分布如表 1 所示。

表 1 不加滤波器时的谐波电流分布

Tab.1 Harmonic current distribution without filters

项目	相电流/A			
	基波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧负载	648.4	145.0	69.3	53.2
II 侧负载	287.1	64.7	32.6	25.3
I 侧电源	474.7	105.1	51.0	39.3
II 侧电源	460.8	104.5	50.8	39.3
联络线	173.7	40.0	18.4	13.9

从表 1 中可知,不加装滤波器时,注入 I 侧电源的 5 次、7 次和 11 次谐波电流分别为 105.1 A、51.0 A 和 39.3 A,相应的谐波电流含有率(HRI)分别为 22.1 %、10.7 %和 8.3 %。此时,联络线上的基波电流为 173.7 A,5 次、7 次和 11 次谐波电流分别为 40.0 A、18.4 A 和 13.9 A。

4.1 2 种滤波方案效果比较

4.1.1 分布式无源滤波方案

在图 10 所示的仿真电路 ③~⑥ 处投入 PF,PF 采用图 5 所示的结构。此时,负载、电源以及联络线上的谐波电流分布如表 2 所示。

从表 1 和表 2 可得 PF 对各次谐波电流的吸收

表 2 分布式无源滤波方案的谐波电流分布

Tab.2 Harmonic current distribution of harmonic suppression scheme with PFs

项目	相电流/A			
	基波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧负载	651.6	60.5	20.8	20.4
II 侧负载	291.6	12.4	5.2	12.5
I 侧电源	475.7	32.9	12.0	8.6
II 侧电源	463.4	32.1	11.8	8.4
联络线	178.7	28.9	9.4	14.0

率(见表 3),其中,I 侧负载 5 次、7 次、11 次谐波电流的吸收率分别只有 58.3 %、69.9 %和 61.6 %,且注入电源的谐波电流吸收率也很低,母线电压波形畸变严重,联络线上的谐波流动情况没有得到明显改善,电能质量提高有限。

表 3 分布式无源滤波的谐波电流吸收率

Tab.3 Harmonic current absorption ratio of harmonic suppression scheme with distributed PFs

项目	谐波电流吸收率/%		
	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧电源	68.7	76.5	78.1
II 侧电源	69.3	76.7	78.6
联络线	27.7	48.9	0

4.1.2 并列运行 APF 滤波方案

在图 10 所示的仿真电路①②处投入并列运行的 APF,表 4 给出了谐波电流分布情况。并列运行 APF 滤波后,谐波电流吸收率和含有率见表 5。

表 4 并列运行 APF 滤波方案的谐波电流分布情况

Tab.4 Harmonic current distribution of harmonic suppression scheme with APFs

项目	相电流/A			
	基波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧负载	653.5	146.7	73.2	57.4
II 侧负载	289.3	65.3	33.1	26.1
I 侧电源	492.1	0.7	4.7	5.3
II 侧电源	480.1	0.5	4.7	5.3
联络线	175.7	1.5	0.6	0.2

表 5 并列运行 APF 滤波方案的谐波电流吸收率和滤波后谐波含有率

Tab.5 Harmonic current absorption ratio and HRI of harmonic suppression scheme with APFs %

项目	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波	
吸收率	I 侧电源	99.3	90.8	86.5
	II 侧电源	99.5	90.7	86.5
	联络线	96.3	96.7	98.6
含有率	I 侧电源	0.1	0.9	1.1
	II 侧电源	0.1	1.0	1.1
	联络线	0.8	0.3	0.1

比较表 2 和表 4、表 3 和表 5 中的数据可知,采用并列运行 APF 滤波方案,5 次谐波吸收率达到 96 % 以上,其他各次谐波电流的吸收率比分布式 PF 方案均有大幅度提高;注入电源的电流中各次谐波含有率均不超过 1.1 %,从而能大幅度降低变压器涡流损耗、铁心损耗及发热损耗;联络线电流中的各次谐波电流含有率均小于 0.8 %;显然,与分布式无源滤波方案相比,APF 并列运行方案的谐波治理效果更好,电能质量得到更大程度的改善。

4.2 负载投退对谐波电流分布的影响

用电容滤波不可控整流电路的投退模拟本文第 1 部分中单晶炉的投退。0.3 s 前(即负载扰动之前)并且没有滤波器时的谐波电流分布如表 1 所示。0.3 s 时在图 10 所示电路的 I、II 两侧分别投入参数

不同的整流电路(该电路不含无源滤波装置)。负载扰动后谐波电流分布发生变化,表 6~8 分别给出了在不加滤波装置、分布式无源滤波方案、APF 并列运行 3 种方案的谐波电流分布情况。

表 6 不加装滤波装置的谐波电流分布(负载扰动后)

Tab.6 Harmonic current distribution without filters after load disturbance

项目	相电流/A			
	基波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧负载	877.9	187.2	96.9	66.5
II 侧负载	467.3	98.2	54.6	36.5
I 侧电源	680.5	143.0	75.9	51.5
II 侧电源	664.7	142.4	75.7	51.5
联络线	197.5	44.2	21.1	15.0

表 7 无源滤波方案的谐波电流分布(负载扰动后)

Tab.7 Harmonic current distribution of harmonic suppression scheme with PFs after load disturbance

项目	相电流/A			
	基波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧电源	681.2	39.5	15.7	11.5
II 侧电源	666.5	39.2	15.7	11.2
联络线	202.6	13.4	1.8	15.0

表 8 APF 并列运行方案的谐波电流分布(负载扰动后)

Tab.8 Harmonic current distribution of harmonic suppression scheme with APFs after load disturbance

项目	相电流/A			
	基波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧负载	886.0	191.8	105.2	76.0
II 侧负载	471.5	100.7	57.9	40.6
I 侧电源	696.3	2.2	4.5	3.5
II 侧电源	681.8	2.2	4.5	3.6
联络线	199.8	1.28	0.6	0.8

从表 6 和表 1 中的数据可知,注入两侧电源和流过联络线的谐波电流在负载扰动后都有显著变化,即有谐波电流在母联和支路上的穿行。如负载扰动增大,谐波穿行现象将会更严重。

从表 6~8 中注入两侧电源和流过联络线的电流值可得相应的谐波吸收率,如表 9 所示。从表 9 中数据可知:负载扰动后,APF 并列运行的谐波电流吸收率仍保持在 93.0 % 以上,5 次谐波电流吸收率达到 97.0 % 以上,注入电源、流过联络线的谐波电流与负载扰动前(如表 4 所示)相比,变化较小,表现出较好的动态性能,滤波效果远优于无源滤波。

以 I 侧负载 12 为例考察负载扰动对 PF 的影响,表 10 给出了该负载滤波器 PF₁₂ 的各滤波支路的电流变化情况。负载扰动后注入新的谐波分量,流过 PF₁₂ 各滤波支路的电流均有所增加,即新注入的谐波电流在网络中进行了重新分配,这与式(4)所得结论一致。显然,如果负载扰动较大,PF 支路容易过载甚至损坏。

表 9 负载扰动后分布式无源滤波及 APF 并列方案的谐波电流吸收率

Tab.9 Harmonic current absorption ratios of two harmonic suppression schemes after load disturbance				
项目	谐波电流吸收率/%			
	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波	
PF	I 侧电源	72.4	79.3	77.7
	II 侧电源	72.5	79.3	78.2
	联络线	69.7	91.4	0
APF	I 侧电源	98.5	94.3	93.2
	II 侧电源	98.5	94.1	93.0
	联络线	97.1	97.2	94.7

表 10 负载扰动前后 I 侧 PF₁₂ 各滤波支路电流变化情况

Tab.10 Harmonic current distribution of passive filtering branches of PF ₁₂ at I side before and after load disturbance			
支路	相电流/A		
	负载扰动前	负载扰动后	电流变化量
5 次	45.6	49.8	4.2
7 次	22.8	27.6	4.8
11 次	12.0	19.2	7.2

4.3 PF 支路投退对谐波电流分布的影响

用图 10 中 I 侧负载 11 的无源滤波 5 次支路在 0.3 s 时退出来模拟本文第 1 部分单晶炉的滤波支路退出这一工况。0.3 s 前谐波电流分布情况如表 2 所示。无源滤波器 PF₁₁ 的 5 次支路退出后,注入电源的谐波电流、流过联络线的谐波电流、I 侧负载 11 的滤波器 PF₁₁ 其他支路电流、I 侧负载 12 的滤波器 PF₁₂ 各滤波支路电流、II 侧负载 21 的滤波器 PF₂₁ 各滤波支路电流的变化情况如表 11、12 所示。

从表 11 和表 2 中的数据可知,滤波支路退出运

表 11 PF₁₁ 的 5 次滤波支路退出后的供电网络谐波电流分布

Tab.11 Harmonic current distribution after switch-off of 5th filtering branch of PF ₁₁				
项目	相电流/A			
	基波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
I 侧电源	475.2	42.2	9.6	8.4
II 侧电源	463.0	40.9	9.6	8.2
联络线	178.7	43.5	9.9	14.4

表 12 PF₁₁ 的 5 次滤波支路退出前后各滤波器滤波支路电流变化情况

Tab.12 Harmonic current distribution of passive filtering branches before and after switch-off of 5th filtering branch of PF ₁₁				
滤波器	支路	相电流/A		
		退出前	退出后	电流变化量
PF ₁₁	5 次	52.7	0	-52.70
	7 次	26.2	38.8	12.60
	11 次	7.8	9.1	1.30
PF ₁₂	5 次	45.6	54.0	8.40
	7 次	22.8	29.4	6.60
	11 次	12.0	12.12	0.12
PF ₂₁	5 次	45.6	54.6	9.00
	7 次	22.8	28.8	6.00
	11 次	12.0	12.6	0.60

行后注入两侧电源和流过联络线的 5 次谐波电流都有大幅度增加,7 次谐波电流值也发生明显变化,即当等效阻抗变化时,谐波电流会按新的谐波阻抗值重新分配,从而出现了谐波电流在母联线上的穿行现象。这与式(3)(4)所得结论一致。

从表 12 的数据可知,滤波支路退出运行不仅会对本滤波器的其他滤波支路电流产生影响,也会对本侧其他负载的 PF 支路以及 II 侧负载的 PF 支路电流带来影响。产生这些影响的原因同样在于谐波阻抗的变化引起谐波电流的重新分配,与上述结论一致。

4.4 试验波形

在仿真分析的基础上,将本文所提 APF 并列运行谐波治理方法应用到 1.1 节所述单晶硅生产系统中,所得 1 号变压器低压侧母线总进线的电流测试波形如图 11 所示。比较图 11 与图 2,显然可知,APF 并列运行方案对该生产系统的谐波治理是非常有效的。通过电能质量测试仪测得的电压总畸变率仅为 0.3%,各次谐波电压、电流值均很小。同时,通过综合自动化后台看到的流经母联的谐波电流不超过 5 A。试验结果与仿真结果一致。

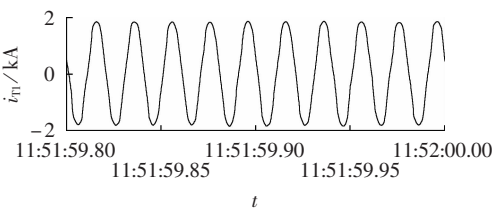


图 11 采用 APF 并列运行谐波治理方案后 1 号变压器的电流测试波形

Fig.11 Tested current waveform of transformer 1 with APFs in parallel operation

5 结论

通过母联断路器连接的 2 条母线分别对非线性负载供电,电源受到严重的谐波污染,联络线上有大量谐波电流流过,且存在谐波放大的风险。本文对谐波穿行现象产生的原因、无源滤波方案下谐波电流在母联断路器和滤波支路间穿行的原因以及 APF 并列运行抑制谐波穿行的原理进行了详细分析,并在此基础上针对分布式无源滤波方案中存在的谐波电流吸收率低、谐波电流超标、谐波电流穿行、滤波支路易过载、电能质量较差等问题,提出 APF 并列运行的滤波方案,对 APF 谐波检测环节输入信号的选取方式进行了改进,并将锁相环原理应用到 APF 直流侧电容电压控制中,获得了较好的动态性能。通过 PSCAD/EMTDC 仿真分析,详细讨论了负载扰动时 2 种滤波方案下供电网络谐波电流的变化情况,无源滤波方案中滤波支路的投退对供电网络电流分布以及所有滤波器支路电流的影响。试验结果、仿真结果和理论分析相互验证,同时有力地证明了 APF 并列运行滤波方案的可行性、有效性和实用性。

参考文献:

- [1] 戴朝波,林海雪,雷林绪. 单相并联型电力有源滤波器的仿真分析[J]. 电网技术,2001,25(8):28-32.
DAI Chaobo,LIN Haixue,LEI Linxu. Simulation and analysis of single phase shunt active power filter[J]. Power System Technology,2001,25(8):28-32.
- [2] 谢小荣,姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006:47-62,446-462.
- [3] 王建元,张国富. 有源电力滤波器的控制策略综述[J]. 电气传动,2007,37(6):6-11.
WANG Jianyuan,ZHANG Guofu. Overviews of control strategy of active power filter[J]. Electric Drive,2007,37(6):6-11.
- [4] 徐明,周林,王伟,等. 单相有源电力滤波器的单周控制策略综述[J]. 电网技术,2006,30(22):81-86.
XU Ming,ZHOU Lin,WANG Wei,et al. A survey on one-cycle control strategy for single-phase active power filters[J]. Power System Technology,2006,30(22):81-86.
- [5] 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.
- [6] 曾勇. 硅单晶生长炉谐波治理技术方案分析[J]. 新疆职业大学学报,2008,16(2):73-74.
ZENG Yong. Technical analysis of harmonic control plan of crystal silicon growth furnace[J]. Journal of Xinjiang Vocational University,2008,16(2):73-74.
- [7] 吴卫民,童立青,钱照明,等. 新型串联混合有源电力滤波器控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):38-43.
WU Weimin,TONG Liqing,QIAN Zhaoming,et al. A research on new control strategy for series type active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3):38-43.
- [8] 李战鹰,任震,杨泽明. 有源滤波装置及其应用研究综述[J]. 电网技术,2004,28(11):40-43.
LI Zhanying,REN Zhen,YANG Zeming. Survey on active power filter devices and their application study[J]. Power System Technology,2004,28(11):40-43.
- [9] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京:中国电力出版社,2006:7-12.
- [10] 魏学良,戴珂,方昕,等. 三相并联型有源电力滤波器补偿电流性能分析与改进[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):113-119.
WEI Xueliang,DAI Ke,FANG Xin,et al. Performance analysis and improvement of output for three-phase shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(28):113-119.
- [11] 姜齐荣,赵东元,陈建业. 有源电力滤波器:结构·原理·控制[M]. 北京:科学出版社,2005:85-103.
- [12] 戴朝波,林海雪. 电压源型逆变器三角载波电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(2):99-102.
DAI Chaobo,LIN Haixue. A novel triangular carrier current control for voltage source inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(2):99-102.
- [13] WANG Xuanyuan,KAZERANI M. A modular photovoltaic grid-connected inverter based on phase-shifted-carrier technique[C]//Proceedings of 2002 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS 2002). Pittsburgh,Pennsylvania,USA:IEEE,2002:2250-2252.
- [14] WANG Xuanyuan,KAZERANI M. A multicarrier modular photovoltaic grid-connected inverter with a new phase-shift rule[J]. Electric Power System Research,2007,77(7):754-760.
- [15] LIANG Yiqiao,NWANKPA C O. A new type of STATCOM based on cascading voltage source inverters with phase-shifted unipolar SPWM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1999,35(5):1447-1452.
- [16] 陈兵,谢运祥,宋静娴. 单周控制有源电力滤波器关键参数的最优选择[J]. 电工技术学报,2008,23(7):86-91.
CHEN Bing,XIE Yunxiang,SONG Jingxian. Optimal selection of some important parameters in one-cycle controlled active power filter[J]. Transactions of China Electricotechnical Society,2008,23(7):86-91.
- [17] 李庚银,陈志业,杨以涵,等. 有源补偿器直流侧电压控制系统[J]. 华北电力大学学报,1997,24(3):1-7.
LI Gengyin,CHEN Zhiye,YANG Yihan,et al. A study of DC voltage control system for an active power filter[J]. Journal of North China Electric Power University,1997,24(3):1-7.
- [18] 李庚银,陈志业,丁巧林,等. $dq0$ 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报,1996,16(3):176-179.
LI Gengyin,CHEN Zhiye,DING Qiaolin,et al. Definition of generalized instantaneous reactive power in $dq0$ coordinates and its compensation[J]. Proceedings of the CSEE,1996,16(3):176-179.
- [19] 李庚银. 电力系统谐波分析和无功功率理论及其综合补偿的研究[D]. 保定:华北电力大学电力工程系,1995.
LI Gengyin. Study on power system harmonic analysis and reactive power theory and its combined compensation[D]. Baoding: North China Electric Power University,1995.
- [20] 谢邦立,蒋金明,李治理. 锁相环技术在三相可逆 PWM 整流器中的应用研究[J]. 电气传动,2008,38(10):29-32.
XIE Bangli,JIANG Jinming,LI Zhili. PLL application research in three-phase reversible PWM rectifier[J]. Electric Drive,2008,38(10):29-32.
- [21] 曹世华,张维娜,沈鸿,等. 新型软件锁相环三相电压型 PWM 整流器的控制[J]. 电力电子技术,2008,42(5):72-73.
CAO Shihua,ZHANG Weina,SHEN Hong,et al. Three-phase voltage PWM rectifier control of novel soft phase-locked loop[J]. Power Electronics,2008,42(5):72-73.
- [22] BEST E R. 锁相环设计、仿真与应用[M]. 李永明,王海永,肖珺,等. 译. 北京:清华大学出版社,2007:66-83.
- [23] 李占友,潘蕾. 基于瞬时无功功率理论的电网谐波电流检测方法仿真研究[J]. 自动化技术与应用,2008,27(7):83-86.
LI Zhanyou,PAN Lei. Harmonic detection of the grid current based on instantaneous reactive power[J]. Techniques of Automation & Applications,2008,27(7):83-86.
- [24] 王玉凤,范必双,王英健. 数字锁相环在电力系统谐波检测中的应用[J]. 电子技术应用,2008,34(4):51-52.
WANG Yufeng,FAN Bishuang,WANG Yingjian. The use of digital phase locked logic for harmonic measurement in power system[J]. Application of Electronic Technique,2008,34(4):51-52.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

吉 平(1983-),女,山西临汾人,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:jiping@126.com);

戴朝波(1972-),男,浙江宁波人,高级工程师,博士,从事 FACTS 技术及电力电子装置的应用研究工作;

武守远(1964-),男,山东滨州人,教授级高级工程师,博士,从事电力系统分析与控制、FACTS 技术及电力电子装置的应用研究工作。

Parallel operation scheme of active power filter

JI Ping, DAI Chaobo, WU Shouyuan

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To ensure the power supply reliability, sometimes two buses may be connected by a closed circuit breaker to feed nonlinear loads. When the passive filter is applied in harmonic suppression, the harmonic current may flow through the circuit breaker and filter branches. A harmonic suppression scheme with APFs (Active Power Filters) in parallel operation is developed. The causes of harmonic walking-through and the principle of its restraint by APFs are analyzed. The filtering effect is compared between the distributed passive filters and parallel APFs based on PSCAD/EMTDC for two operating conditions: the load disturbance and the on-off of passive filters. Simulative results show that, the harmonic suppression scheme with APFs in parallel operation has no the problems existing in the harmonic suppression scheme with distributed passive filters, such as low harmonic current absorption ratio, harmonic current walking-through, filtering branch overload, poor power quality and so on.

Key words: active power filter; parallel operation; harmonic walking through; passive filter; power quality