

有源滤波器在不同网络中的应用分析

陆康, 刁倩

(安徽理工大学电气学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 介绍了并联型有源滤波器对谐波抑制的作用。基于电压检测控制的并联型有源电力滤波器相当于一个有源阻尼, 对谐波分量呈现出阻抗特性, 除了具有抑制谐波进入电网的能力之外, 还能阻尼谐波共振。将并联型有源电力滤波器应用于两种不同类型的电力线网络, 然后评估其在不同类型网络结构中的滤波和阻尼共振的性能。第一种电力网为 220 V 配电网, 第二种电力网为简化的 150 kV 太阳能发电网络, 容量为 444.4 MVA。并且使用谐波共振模态分析和计算参与因数的方法来确定有源滤波器的最佳安置位置, 使有源滤波器滤波和抑制共振的效果最优。

关键词: 有源滤波; 电压检测; 谐波共振; 模态分析; 参与因数

Analysis of active power filter applications in different networks

LU Kang, DIAO Qian

(School of Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: This paper introduces the effect of shunt active power filter on harmonic suppression. The shunt active power filter based on voltage detection control corresponds to an active damping, presenting the characteristic impedance to harmonic component, in addition to restraining harmonics into the power grid, but also damping harmonic resonance. A shunt active power filter is applied to two different types of power line network and then to evaluate the performance of filter and the damping resonance in different types of the network. The first power system is a 220 V distribution network. The second simplified one is a 150 kV solar power with a capacity of 444.4 MVA. It makes sure the best location of active filter via harmonic resonance modal analysis and calculates the participation factor to make the active filter filtering and restrain the resonance work well.

Key words: shunt active power filter; voltage control; harmonic resonance; modal analysis; participation factor

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0143-07

0 引言

随着大量非线性负荷的使用, 造成供电系统中谐波污染越来越严重, 谐波损耗也日益增加, 对我国节能减排的影响也日益严重^[1-4]。谐波在配电网和输电线路中的传播逐渐成为降低电能质量的重要因素。大型分布式发电网络中谐波问题比较严重, 如太阳能发电站中增加使用的电力电子变流器导致谐波分量^[5-7]。因此在建设大型分布式发电网络的过程中需要考虑输电线路中如何配置无功补偿装置、功率因数校正装置以及系统网络结构等因素从而减小对电网的危害。这些因素导致了对谐波共振问题的关注。在某些情况下, 无源滤波器件和系统阻抗会发生共振现象。共振将导致因并联谐振产生的电压畸变或因串联谐振产生的高次谐波电流在谐振频

率点被放大^[8-9]。所以, 在建设大型分布式发电网过程中, 第一, 确保没有共振危险的存在, 第二, 抑制谐波扩散到电网侧。本文最终的目标是找到对分布式发电网和配电网提供有效的滤波和阻尼谐振的措施。本文应用有源阻尼来抑制网络的谐振。有源阻尼的原理是对谐振频率呈现出高阻抗, 以达到阻尼谐振的目的。有源阻尼可以通过有源滤波器与无源滤波器结合或混合型滤波器来实现^[10]。基于电压检测的并联型有源滤波器在安置点可以实现有源阻尼。本文也研究了在同一网络的不同节点安置有源滤波器来评估其对电网络的滤波和抑制谐振的性能。非常有趣的是通过使用谐波共振模态分析和灵敏度矩阵评估方法计算参与因素来分析有源滤波器滤波和阻尼谐振的性能。实验结果进一步证明了基于电压检测型的并联型有源滤波器具有滤波和抑制

谐振的能力。

1 电压检测型有源滤波器工作原理

本文研究的有源滤波器主要应用于额定电压和容量分别设计为 220 V、20 kVA 的供配电线路，因此有源滤波器的主电路需要使用 410 V 的直流电压变换器和容量为 1 000 μF 的电容器。主电路中应用了 LCL 滤波器，LCL 滤波器因具有较高的高频衰减率及动态性能，能够抑制高次谐波分量进入电网、系统不需要配备专用的高频滤波器，更大程度减少谐波对电网的危害^[11]。有源滤波器的简化电路如图 1 所示。有源滤波器对输电线路的补偿主要依靠电网电压与变流器直流侧电压 V_d 的压差施加在 LCL 上实现的。变流器直流侧电容电压 V_d 需要维持恒定来保证滤波器对谐波分量的跟踪能力。当 V_d 减小时，变流器工作在整流状态对电容充电；当 V_d 增大时，变流器工作在逆变状态对电容放电^[12]。变流器的工作状态是由驱动电路来控制的。有源滤波器在安置点用检测三相瞬时电压 $V_{S(a,b,c)}$ 的方法检测谐波。电压的基波部分通过低通滤波器来提取。然后用原始电压减去基波电压分量得到谐波电压分量 $V_{Sh(a,b,c)}$ 。

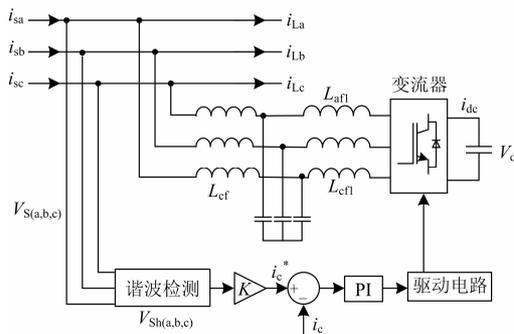


图 1 有源滤波电路原理图

Fig. 1 Principle diagram of active filter circuit

将得到的谐波电压 $V_{Sh(a,b,c)}$ 乘以增益 K ，就得到指令补偿电流 i_c^* ，即 $i_c^* = V_{Sh(a,b,c)} \cdot K$ 。有源滤波器根据指令补偿电流信号输出补偿电流 i_c 。因此，有源滤波器只对谐波频率呈现出 $1/K$ 的阻抗，而对于基波频率，有源滤波器呈现出无限大的阻抗。

2 电力网络的仿真实验

在本研究中模拟了两种电力网络。第一种网络是电压为 220 V 的分布式配电网；第二种是电压等级为 150 kV 并且容量为 444.4 MVA 的简化太阳能发电网络。

2.1 220 V 分布式配电网

电压等级为 220 V，频率为 50 Hz，容量为 20 kVA 的分布式电网模型引用自参考文献[13]。分布式三相配电网的等效电路如图 2 所示，图中 V 表示电源电压，电源沿着架空线路往用户供电，经过节点 1、2、3，到达用户，用户在用电过程中产生的谐波用电流源 I_h 代替。架空线路用集总的 LR 电路来表示。 L_{B1} 表示变压器的漏感， L_{B2} 和 L_{B3} 对应于供配电线路的电感^[13]。电容器代表了架空线路的并联电容，并且功率因数校正装置分散在整个供配电线路中。所有单相的等效电路参数如表 1 所示。

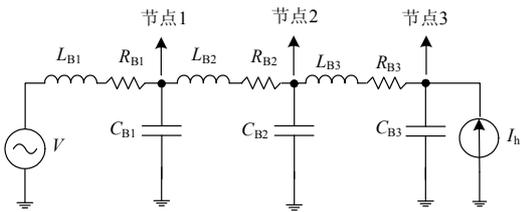


图 2 分布式网络的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of distributed network

表 1 供电线路参数

Table 1 Transmission line parameters

三相供电线路参数	
额定电压 220 V，频率 50 Hz，容量 20 kVA	
$L_{B1}=L_{B2}=L_{B3}$	0.18 mH
$C_{B1}=C_{B2}=C_{B3}$	150 μF
$R_{B2}=R_{B3}$	0.05 Ω
R_{B1}	0.02 Ω

2.2 简化的太阳能发电网络

简化的太阳能发电网络模型如图 3 所示，引用自参考文献[14]。图 3 中电源电压用 V 表示，太阳能电池发的直流电经逆变后才能并网，但是在逆变的过程中使用的电力电子器件会产生谐波，因此用谐波源 I_h 代替。 L_{B1} 和 L_{B2} 分别表示变压器的漏感和输电线路的感抗。 L_{B3} 、 L_{B4} 和 C_{B2} 、 C_{B3} 、 C_{B4} 、

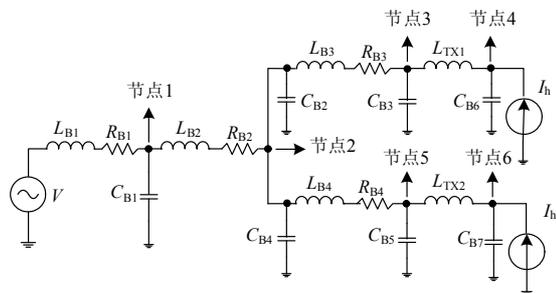


图 3 太阳能发电网络等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of solar power network

C_{B5} 表示输电线路的电缆。 L_{TX1} 、 L_{TX2} 表示变压器的电感, 假定两条输电线路的参数是一样的。电网电压等级为 150 kV, 频率 50 Hz, 容量为 444.44 MVA。所有单相等效电路参数如表 2 所示。

表 2 太阳能发电网络输电线路参数

Table 2 Solar power network transmission line parameters

三相输电线路参数	
额定电压: 150 kV, 频率: 50 Hz, 容量: 444.4 MVA	
L_{B1}	0.019 8 H
C_{B1}	8.22 μ F
L_{B2}	0.019 33 H
$L_{B3}=L_{B4}$	0.001 H
$R_{B3}=R_{B4}$	0.056 Ω
$C_{B23}=C_{B3}=C_{B43}=C_{B5}$	0.28 μ F
$L_{TX1}=L_{TX2}$	0.038 67 H
$C_{B6}=C_{B7}$	0.052 μ F

实际中, 网络的正常运行受到用户的影响, 网络参数随时发生变化但是不会对整个网络造成大的影响, 网络的谐振频率不会发生大的偏移, 这点对于接下来的实验分析很重要。两种电力网络的仿真实验均用 Matlab 软件实现。为了评估有源滤波器阻尼谐波共振的效果, 在谐波电路中注入特定的谐波电流。如图 4、图 5 所示, 由频率扫描技术可以看出明显的谐波共振出现在 7 次和 20 次谐波频率, 所以分别将包含 8% 的 7 次谐波分量和 8% 的 20 次谐波分量的电流注入电路来单独分析。实验中使用了谐波共振模态技术和灵敏度矩阵评估方法确定有源滤波器的最佳安置位置^[15-16]。确定的方法是用节点对谐振频率的模态阻抗结合灵敏度矩阵评估方法计算出网络节点对谐振频率的参与因数(PF)。该参与因数值的大小表征了任何一个节点对于特定谐波频率的共振水平^[17-18]。预计如果一个节点的参与因数(PF)值更高, 则这个节点是最合适安装滤波器并且获得最好的滤波效果。虽然有源滤波器在实际工作时是对谐波分量总和叠加一个幅值相等相位相反的量从而达到抑制谐波的目的, 但是各次谐波含量所占的比例不一样, 通常是低次谐波分量比高次谐波分量, 因此根据参数扫描法寻找到网络的共振最明显节点, 在共振最明显的节点安装有源滤波器有助于大幅滤除主要的谐波分量并且阻尼谐波引起的谐振。因此, 提高了电能的质量。

3 结果与分析

3.1 220 V 分布式电网——共振分析与有源滤波器的安置

实验中, 使用频率扫描和模态分析来识别谐波

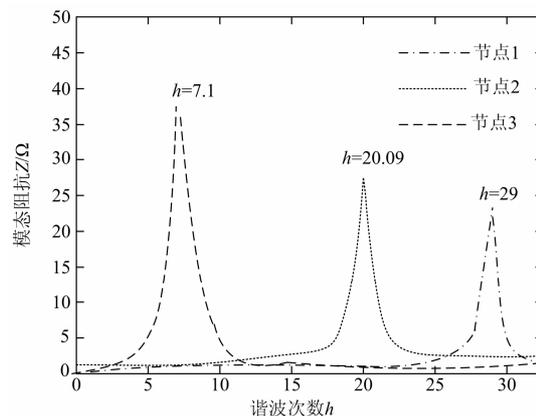


图 4 图 2 所示网络模型的模态阻抗

Fig. 4 Network modal impedance in Fig. 2

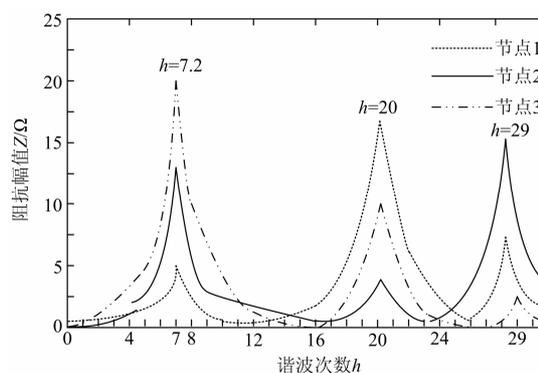


图 5 图 2 所示网络模型的频率扫描结果

Fig. 5 Frequency scan results of network model in Fig. 2

共振频率并且辅助确定有源滤波器的安装位置。图 4 和图 5 示出了网络的模态阻抗与共振频率, 分别为 7 次, 20 次和 29 次谐波。表 3 给出了网络节点对于三种谐振频率的参与因数。由表 3 可以看出节点 3 对于 7 次谐波频率有最大的参与因数($PF=0.543 7$), 节点 1 对于 20 次谐振频率有最大的参与因数($PF=0.543 2$), 节点 2 对于 29 次谐波频率有最大的参与因数($PF=0.543 1$)。因此在节点 3 处安置有源滤波器滤除 7 次谐波最好。如果滤波器安装在其他节点处, 则会降低抑制谐波的效率。相应地, 仅有 20 次谐波电流注入电网络时, 在节点 1 安装滤波器滤除 20 次谐波效果最好。

表 3 共振频率与参与因数

Table 3 Resonance frequency and participation factor

共振频率	模态阻抗	高参与因数(PF)	可能的共振节点	导纳节点
7	35.60	0.543 7	3	(3,3)
20	30.38	0.543 2	1	(1,1)
29	25.66	0.543 1	2	(2,2)

3.2 220 V 分布式电网——谐波分别注入网络节点

3.2.1 仅 7 次谐波电流注入

将 8% 的 7 次谐波注入电网中，看它是如何在分布式电网中传输的。图 6 分别给出了在节点 1，节点 2，节点 3 未设置滤波器时的电流和电压波形。如图 7 所示，当有源滤波器应用在节点 1 处时，它能够充分减小所有节点谐波分量，但是电流在节点 1，2，3 中仍然含有明显的 7 次谐波，并且阻尼共振效应不足以减小谐波。当滤波器安装在节点 3 处，如图 8 所示，节点 1、2、3 处的电流得到明显的改善，主要是由于有源滤波器阻尼了 7 次谐波共振。这与之前得到的 PF 参数以及对于 PF 的推论不谋而合。各个节点分别在滤波器安装前后电压电流中含 7 次谐波的详细情况在表 4 中给出了。从表 4 中可看出，最好的结果是将滤波器安装在节点 3 处，因节点 3 处最靠近负载谐波源。

3.2.2 仅注入 20 次谐波电流

仅仅注入 20 次的谐波电流，并且在各个节点安放滤波器，实行与前述类似的分析方法。因为通过节点 1 的 20 次谐波最多，可以推测滤波器安装在节点 1 处也将对谐波电流有良好的抑制效果。这一点在表 5 中得到了验证，当在节点 1 处应用滤波器时，20 次谐波得到了大幅的消减。

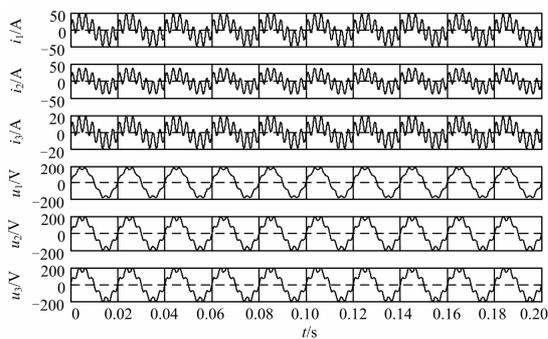


图 6 未滤波时节点 1、2、3 的电压电流波形
Fig. 6 Voltage and current waveform at point 1, 2, 3 without filtering

表 4 电压电流中所含的 7 次谐波百分量

Table 4 Voltage and current contains components of seven times harmonic

	无 APF	APF 在节点 1	APF 在节点 2	APF 在节点 3
注入谐波电流	8	8	8	8
节点 1 处电流	30.98	5.4	1.95	1.37
节点 2 处电流	25.16	5.68	1.58	1.11
节点 3 处电流	14.62	3.86	2.43	0.65
节点 1 处电压	14.73	2.57	0.93	0.66
节点 2 处电压	26.73	5.12	1.69	1.19
节点 3 处电压	33.66	6.77	2.45	1.50

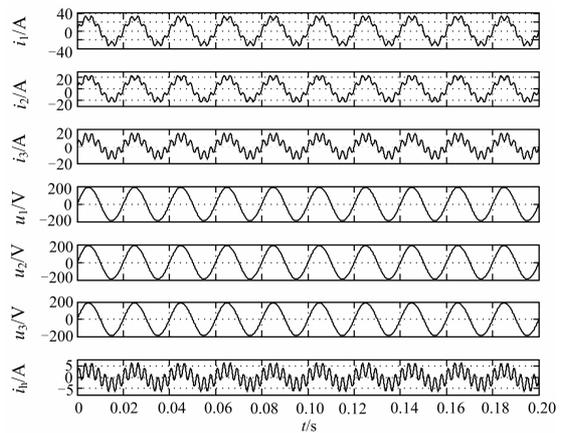


图 7 有源滤波器在节点 1 处时节点 1、2、3 处的电压电流波形
Fig. 7 Voltage and current waveform at point 1, 2, 3 when active filter at the node 1

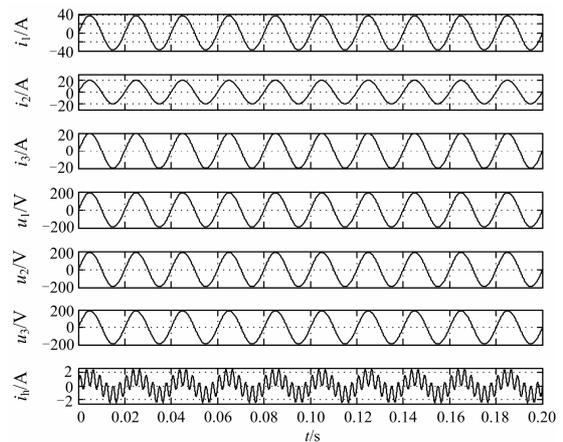


图 8 有源滤波器在节点 3 处时节点 1、2、3 处的电压电流波形
Fig. 8 Voltage and current waveform of point 1, 2, 3 when active filter at the node 3

3.3 简化等效的太阳能发电网络——共振分析和有源滤波器的安置

图9和图10相应给出了频率扫描结果和简化的等效太阳能发电网络的模态阻抗。从图9和图10可以看出分别在7.1次、21.5次、70次和74.5次谐波频率发生谐振。7次和22次谐振是比较严重的。在表6中详细列出了每个节点对于各次谐波频率谐振峰值的参与因数。因为电力网是对称的,节点3和节点5的参与因数相似,节点4和节点6的参与

表5 节点中所含的20次谐波百分量

Table 5 Node contains 20 times harmonic component

	无 APF	APF 在节点 1	APF 在节点 2	APF 在节点 3
注入谐波电流	8	8	8	8
节点 1 处电流	38.45	0.74	5.41	1.12
节点 2 处电流	20.63	1.55	2.81	0.60
节点 3 处电流	48.05	1.61	4.56	1.41
节点 1 处电压	52.22	1.00	7.63	1.52
节点 2 处电压	24.26	2.50	3.86	0.72
节点 3 处电压	41.02	1.12	3.43	1.20

因数相似。有趣的是,在70次和74.5次谐波处,节点4和节点6的参与系数很明显,分别为最高。可是在22次谐波共振处,节点3、4、5、6的参与因数非常接近,因此在节点3、4、5、6处安装滤波器有可能有助于阻尼共振。节点1对于22次共振没有影响。对于7次共振,所有节点参与系数几乎都一样,所以,所有的节点对于7次谐波共振的抑制通过安装滤波器并不明显。通过安装有源滤波器阻尼共振来改善网络可以像之前的分析那样来达到最大化。

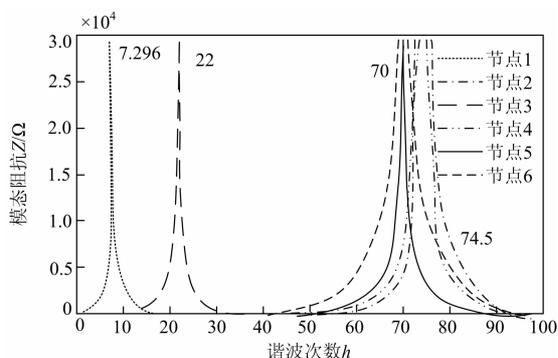


图9 图5所示网络模型的频率扫描结果

Fig. 9 Frequency scan results of network model shown in Fig. 5

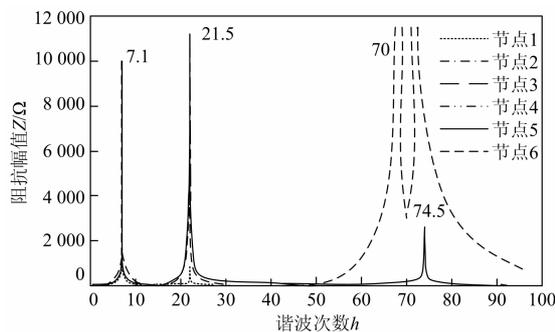


图10 图5所示网络模型的模态阻抗

Fig. 10 Modal impedance of network model shown in Fig. 5

表6 每一谐振峰值处节点的参与因数的值

Table 6 Participation factor value in each nodes at resonance peak

h	7.296	22	70	74.5
频率	364.8	1 100	3 500	3 725
节点#	参与因数			
节点 1	0.131 8	0.005 3	0.000 0	0.000 0
节点 2	0.171 7	0.177 4	0.000 0	0.005 9
节点 3	0.172 3	0.183 4	0.000 4	0.004 5
节点 4	0.176 0	0.225 3	0.499 6	0.492 6
节点 5	0.172 3	0.183 4	0.000 4	0.004 5
节点 6	0.176 0	0.225 3	0.499 6	0.492 6

3.4 简化等效的太阳能发电网络——分别在各节点注入谐波电流

将8%的7次谐波注入到支路末端,图11给出了节点1,2,3中7次谐波的含量。然而,电压中的谐波含量很少。通过在节点4和节点6安装滤波器电流质量得到了改善,但是滤波器并没有完全补偿谐波电流。结果如图12所示。

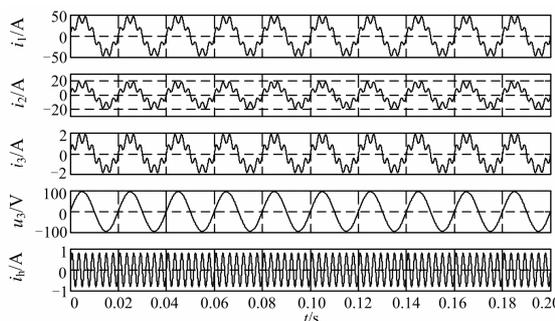


图11 注入7次谐波时节点1、2、3处的电流以及节点3处的电压

Fig. 11 Current at point 1, 2, 3 and the voltage of node 3 when injecting into seven times harmonic

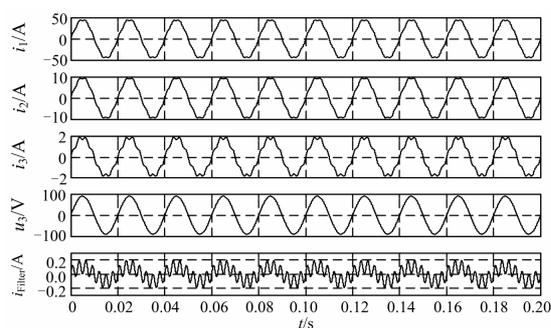


图 12 有源滤波器在节点 4、6 处时，节点 1、2、3 处的电流以及节点 3 处的电压

Fig. 12 Current of node 1, 2, 3 and voltage of node 3 when active filter at the node 4, 6

4 结论

在这篇论文中，使用基于电压检测的并联有源滤波器分析了谐波共振阻尼。并联有源滤波器对于谐波部分呈现出阻抗并且在整个电力网络显示出了充分的滤波能力。在有最特别明显共振的节点或换句话说是有高的参与系数的节点安装有源滤波器最有效。然而，对于参与系数不明显或一些节点有相似的参与系数的例子，需要更多的分析与考虑。

参考文献

- [1] 黎燕, 罗安, 方璐, 等. 高电压等级新型混合型有源滤波器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 146-157.
LI Yan, LUO An, FANG Lu, et al. A novel hybrid active power filter at high-voltage rank[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 146-157.
- [2] 牟龙华, 张大伟, 周伟. 基于并联谐振的新型混合有源滤波器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 161-173.
MU Longhua, ZHANG Dawei, ZHOU Wei. Research on a novel hybrid active power filter based on shunt resonance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 161-173.
- [3] 武健, 刘瑜超, 李晓萌, 等. 基于瞬时值比较的电流型有源滤波器谐振抑制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 72-78.
WU Jian, LIU Yuchao, LI Xiaomeng, et al. Resonance suppression method of current source active power filter based on instantaneous comparison control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 72-78.
- [4] 徐永海, 刘书铭, 朱永强, 等. 并联型有源滤波器的补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 70-75.
XU Yonghai, LIU Shuming, ZHU Yongqiang, et al. Research of shunt active power filter compensation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 70-75.
- [5] 吴春华, 黄建明, 陈卫民, 等. 单相光伏并网与有源滤波的统一控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 103-109.
WU Chunhua, HUANG Jianming, CHEN Weimin, et al. Unified control of single phase photovoltaic grid-connected and active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 103-109.
- [6] 彭晨光, 王瑞闯, 刘连光. 基于相位叠加原理的有源滤波器谐波指令新算法及控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 50-54.
PENG Chenguang, WANG Ruichuang, LIU Lianguang. A novel approach to extracting harmonic instruction and its control of the active power filter based on phase superposition theory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 50-54.
- [7] WAKILEH G J. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 顾舒阳. 谐波共振对电力系统的影响及其解决办法浅析[J]. 机电设备, 2011, 40(4): 40-42.
GU Shuyang. The influence of harmonic resonance on electrical power system and the brief analysis of its solution[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2011, 40(4): 40-42.
- [10] AKAGI H, FUJITA H, WADA K. A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(3): 638-645.
- [11] 郭珂, 曾意, 刘强, 等. LCL 滤波器在具有有源滤波功能的光伏并网系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 73-79.
GUO Ke, ZENG Yi, LIU Qiang, et al. Application of LCL-filter in photovoltaic grid-connected system with

- active power filter function[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 73-79.
- [12] 王立峰, 郑建勇, 梅军, 等. 有源滤波装置直流侧电压控制瞬时能量平衡建模[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 229-234.
WANG Lifeng, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Instantaneous energy equilibrium modeling of DC side voltage control for active power filter device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 229-234.
- [13] 于永源, 杨绮雯. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [14] HASAN K N M, RAUMA K, RODRIGUEZ P, et al. Harmonic resonances and damping in wind power plant[C] // International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), June 12th-14th, 2012.
- [15] 张力, 林建龙, 项辉宇. 模态分析与实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [16] 周双亚, 肖湘宁, 郝君伟, 等. 频率扫描法在次同步振荡分析中的应用[J]. 现代电力, 2011, 28(5): 1-5.
ZHOU Shuangya, XIAO Xiangning, HAO Junwei, et al. Application of frequency scanning method in analyzing sub-synchronous oscillation[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(5): 1-5.
- [17] 兰华, 邓颖, 郝红艳, 等. 基于灵敏度矩阵的分布式状态估计[J]. 吉林电力, 2009, 37(5): 29-32.
LAN Hua, DENG Ying, HAO Hongyan, et al. Distribution status estimation based on sensitivity matrix[J]. Jilin Electric Power, 2009, 37(5): 29-32.
- [18] 王彤, 马静, 王增平, 等. 采用多参数 2 阶摄动灵敏度的电力系统低频振荡模态分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 205-213.
WANG Tong, MA Jing, WANG Zengping, et al. Multiple parameter modal analysis of power system low-frequency oscillation based on the 2nd order sensitivity matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 205-213.

收稿日期: 2014-04-22; 修回日期: 2014-06-09

作者简介:

陆 康(1987-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子与电力传动的研究; E-mail: 562165712@qq.com

刁 倩(1986-), 女, 硕士研究生, 从事控制科学与工程的研究。