

并联有源电力滤波器空间矢量电流控制新方法

赵 伟¹, 王 文², 肖 勇¹, 孟金岭¹, 李 洲², 罗 安²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 基于电压空间矢量分析原理, 提出一种适用于并联型有源电力滤波器的电流控制方法。揭示了参考电流优化跟踪策略, 该策略能保证在单个开关周期内, 使误差电流矢量的幅值以最快的速度逼近于零, 从而实现参考电流的快速跟踪。基于参考电流优化跟踪策略, 在充分考虑逆变器的实际电压输出能力的情况下, 对逆变器输出电压矢量进行精确计算, 并通过在单位开关周期内输出多个基本电压矢量的方法合成该矢量, 以保证误差电流微分矢量同时具有最优方向和最大幅值, 从而在快速跟踪指令电流的同时, 不会造成逆变器不可控, 提高控制系统的快速性和可靠性。实验结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 并联有源电力滤波器; 电流控制; 空间矢量; 矢量合成

中图分类号: TN 713

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.014

0 引言

作为电力系统谐波治理的有效手段, 有源电力滤波器在工业领域的使用越来越广泛, 有源滤波技术成为电力电子技术应用方面的研究热点。在有源滤波技术中, 电流控制器的设计至关重要, 其性能的优劣直接决定了有源电力滤波器的治理效果^[1-3]。

在基于电压源逆变器的有源电力滤波器拓扑结构中, 电压空间矢量脉宽调制 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)方法能有效减少逆变器开关频率波动, 与正弦脉宽调制 SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation)方法相比具有更高的直流侧电压利用率, 因此得到广泛应用。文献[4-6]采用基于最优电压矢量的有源电力滤波器电流滞环控制方法, 通过使逆变器输出最优电压矢量来降低逆变器开关频率, 但在确定参考电压矢量时采用的尝试法会造成额外的计算量, 影响了电流响应速度; 为了降低开关频率而优先选择对应误差电流微分矢量幅值较小的基本电压矢量, 也会在一定程度上降低电流的跟踪速度^[7]。文献[8]采用基于静止坐标变换的双滞环电流控制方法, 在一定程度上解决了电流跟踪速度和开关频率的协调问题, 但是在单位开关周期只有 1 个基本电压矢量作用, 误差电流较大时跟踪速度有限。文献[9]在引入双滞环的基础上, 利用离散控制方法得到逆变器输出电压矢量的精确形式, 使合成的电压矢量完全起到抑制误差电流的作用, 提高了电流跟踪效率, 但是该方法未考虑逆变器的实际输出能力, 在误差电流较大时可能出现逆变器输出电压矢量超出实际输出范围的情况, 降低了逆变器

的可靠性。

本文在分析并联有源电力滤波器 SAPF(Shunt Active Power Filter)空间矢量电流控制基本原理的基础上, 结合参考电流优化跟踪策略, 提出了一种基于空间矢量的 SAPF 电流控制新方法。参考电流优化跟踪策略能保证在 1 个开关周期内, 使误差电流矢量幅值以最快的速度逼近于零, 从而实现参考电流的快速跟踪。新方法在充分考虑逆变器的实际电压输出能力的情况下, 基于参考电流优化跟踪策略, 对逆变器输出电压矢量进行精确计算, 并通过在单位开关周期内输出多个基本电压矢量的方法合成该矢量, 以保证误差电流微分矢量同时具有最优方向和最大幅值, 从而在快速跟踪指令电流的同时, 不会造成逆变器不可控, 提高控制系统的快速性和可靠性。通过实验分析, 对上述原理的有效性进行了验证。

1 有源电力滤波器空间矢量电流控制基本原理

SAPF 的主电路结构如图 1 所示。其中, u_s 、 z_s 、 i_s 、 i_l 分别表示电网电压、线路阻抗、电网电流和负载电流, C 、 u_d 、 z_o 、 i_o 分别表示有源电力滤波器直流侧电容

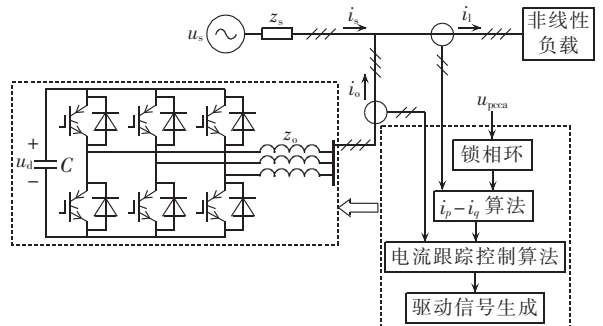


图 1 并联型有源电力滤波器主电路结构图

Fig.1 Main circuit topology of SAPF

收稿日期: 2012-09-08; 修回日期: 2013-05-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009-CB219706)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB219706)

值、直流侧电压、输出电抗器阻抗和输出电流。

SAPF 主电路的简化等效电路如图 2 所示,其中 u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 表示 SAPF 三相输出电压瞬时值, R_o 和 L_o 为输出电抗器的内阻和电感值。

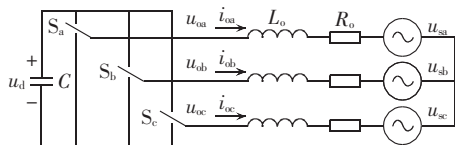


图 2 并联有源电力滤波器的简化等效电路
Fig.2 Simplified equivalent circuit of SAPF

根据基尔霍夫电压电流定律可以得到 SAPF 的输出电压表达式:

$$\begin{cases} u_{oa} = R_o i_{oa} + L_o di_{oa}/dt + u_{sa} \\ u_{ob} = R_o i_{ob} + L_o di_{ob}/dt + u_{sb} \\ u_{oc} = R_o i_{oc} + L_o di_{oc}/dt + u_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

三相旋转坐标系至两相静止坐标系变换 (Clarke 变换) 的表达式为:

$$\mathbf{u} = u_\alpha + ju_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} (u_a + u_b e^{j2\pi/3} + u_c e^{j4\pi/3}) \quad (2)$$

通过式 (2) 可以将三相电压转换至两相静止坐标系中, 以简化电路分析。对三相电流也可以作类似处理。

在两相静止坐标系下, 三相六开关逆变器中各开关的通断组合构成 8 个输出电压矢量, 称为基本输出电压矢量, 分别用 $\mathbf{u}_0 \sim \mathbf{u}_7$ 表示, 其中 $\mathbf{u}_0$ 和 $\mathbf{u}_7$ 的幅值为零, $\mathbf{u}_1 \sim \mathbf{u}_6$ 幅值均为 $\sqrt{6} u_d/3$, 相角互差 60° 。

在单个开关周期内, 通过控制基本输出电压矢量的作用时间, 可以进行输出电压矢量合成。为使逆变器输出电压不发生畸变, 逆变器应工作在线性调制区, 此时输出电压矢量的幅值的变化范围为 $0 \sim \sqrt{2} u_d/2$, 相角变化范围为 $0 \sim 360^\circ$, 即输出电压矢量的变化范围是由基本输出电压矢量终点所构成的正六边形的内切圆 (如图 3 中实线圆所示) 的内部。

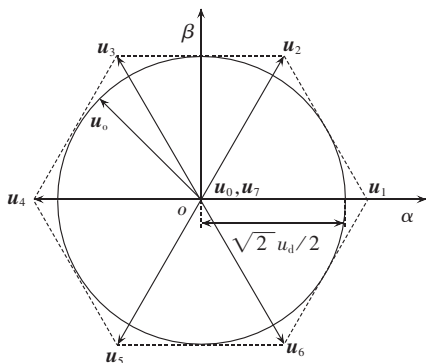


图 3 逆变器输出电压矢量合成示意图

Fig.3 Composition of inverter output voltage vector

在式 (1) 中, 由于输出电感的内阻 R_o 对输出电流的影响远小于其电感值 L_o , 因此可以忽略 R_o 的作

用。利用 Clarke 变换可以将式 (1) 表示为矢量形式:

$$\mathbf{u}_o = L_o \frac{d\mathbf{i}_o}{dt} + \mathbf{u}_s \quad (3)$$

其中, $\mathbf{u}_o$ 、 $\mathbf{i}_o$ 、 $\mathbf{u}_s$ 分别表示 SAPF 输出电压矢量、输出电流矢量和电网电压矢量。

设 SAPF 参考输出电流矢量为 $\mathbf{i}_o^*$, 输出电流误差矢量为 $\boldsymbol{\delta}$, 则式 (3) 可以表示为^[10]:

$$\mathbf{u}_o = \left(L_o \frac{d\mathbf{i}_o^*}{dt} + \mathbf{u}_s \right) - L_o \frac{d\boldsymbol{\delta}}{dt} \quad (4)$$

定义式 (4) 中括弧内的部分为参考电压矢量 $\mathbf{u}_c^*$, 即:

$$\mathbf{u}_c^* = L_o \frac{d\mathbf{i}_o^*}{dt} + \mathbf{u}_s \quad (5)$$

由于逆变器功率器件开关周期远小于工频电源周期, 因此在单个开关周期内可以认为 $\mathbf{u}_c^*$ 恒定^[8]。根据式 (4) 可以得出 SAPF 输出电流误差矢量的表达式:

$$L_o \frac{d\boldsymbol{\delta}}{dt} = \mathbf{u}_c^* - \mathbf{u}_o \quad (6)$$

定义 $L_o d\boldsymbol{\delta}/dt$ 为等效误差电压矢量, 用 $\mathbf{u}_{eq}$ 来表示。式 (6) 表明, 在单个开关周期内, 通过改变逆变器输出电压矢量 $\mathbf{u}_o$, 可以达到控制 $\mathbf{u}_{eq}$ 的目的。设 t_0 时刻误差电流为 $\boldsymbol{\delta}_0$, 在无穷小的时间间隔 Δt 后, 即在 $t_1 = t_0 + \Delta t$ 时刻时, 误差电流变为 $\boldsymbol{\delta}_1$, 则误差电流微分等效为:

$$\frac{d\boldsymbol{\delta}}{dt} = \frac{\boldsymbol{\delta}_1 - \boldsymbol{\delta}_0}{\Delta t} \quad (7)$$

引入等效误差电压矢量, 式 (7) 可改写为:

$$\frac{\Delta t}{L_o} \mathbf{u}_{eq} = \boldsymbol{\delta}_1 - \boldsymbol{\delta}_0 \quad (8)$$

有源电力滤波器的控制目标是降低误差电流矢量的幅值, 即应使 $\|\boldsymbol{\delta}_1\| < \|\boldsymbol{\delta}_0\|$ 。令 $\mathbf{u}_{eq}' = \mathbf{u}_{eq} \Delta t / L_o$, 根据式 (8) 可以画出如图 4 所示的误差电流矢量图, 图中给出了 $\boldsymbol{\delta}_1$ 的 2 个幅值不同的取值 $\boldsymbol{\delta}_{11}$ 和 $\boldsymbol{\delta}_{12}$ 的合成原理, $\boldsymbol{\delta}_{11}$ 、 $\boldsymbol{\delta}_{12}$ 及 $\boldsymbol{\delta}_0$ 三者的幅值关系为 $\|\boldsymbol{\delta}_{11}\| < \|\boldsymbol{\delta}_0\| < \|\boldsymbol{\delta}_{12}\|$ 。

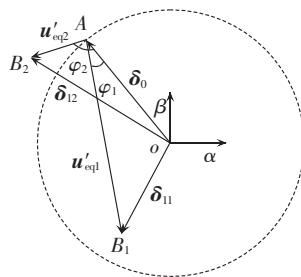


图 4 误差电流矢量图

Fig.4 Vector diagram of error current

图 4 说明, 减小误差电流的幅值可等效为, 保证 $\boldsymbol{\delta}_1$ 在图 4 所示虚线圆的内部。令 $\mathbf{u}_{eq}'$ 与 $-\boldsymbol{\delta}_0$ 的夹角为 φ , 图 4 中, φ_1 和 φ_2 为 φ 的 2 个不同取值。显然, 当 $\varphi \geq 90^\circ$ 时, B 点将无法位于圆内 (如图 4 中 B_2 点所示),

因此 φ 值应小于 90° 。对于圆上 A 点外的任意一点 B ,通过三角函数关系可以求得 $AB=2\|\delta_0\|\cos\varphi$,推广到一般情况,可以得到使 δ_1 位于圆内的 u'_{eq1} 的幅值条件是 $\|u'_{eq1}\|<2\|\delta_0\|\cos\varphi$ 。以上分析说明,使误差电流幅值减小的 u_{eq} 的约束条件为:

$$\begin{cases} \varphi < 90^\circ \\ \|u_{eq}\| < 2L_o\|\delta_0\|\cos\varphi/\Delta t \end{cases} \quad (9)$$

有源电力滤波器空间矢量电流控制的基本原理是,通过改变逆变器输出电压矢量 u_o ,使等效误差电压矢量 u_{eq} 满足式(9)的约束条件,从而达到降低误差电流幅值、实现参考电流跟踪的目的。

2 传统空间矢量电流控制方法

滞环电流控制方法存在诸多弊端,如滞环宽度固定可能导致功率器件开关频率过高,分相控制时三相电流相间影响可能导致开关频率不可控等。传统空间矢量电流控制方法^[4-6]在解决上述问题时,通常采用基于坐标变换和最优电压矢量的参考电流跟踪方法,以保证开关频率可控,同时具有较高的跟踪精度。该方法的基本原理是,根据参考电压矢量 u^* 和输出电流误差矢量 δ 的空间分布,采用一种最优电压矢量选择方法,从逆变器基本输出电压矢量 u_0-u_7 中选择合适的电压矢量 u_o ,使 u_{eq} 与 $-\delta_0$ 的夹角 φ 小于 90° 且 u_{eq} 的幅值较小,从而达到跟踪电流和保证逆变器开关频率较小的目的。表 1 列出了采用传统方法时,瞬时输出电压矢量与 u_c^* 和 δ 的对应关系^[11-14]。

表 1 最优输出电压矢量表
Tab.1 Optimal output voltage vectors

δ 区域	u_c^* 区域					
	I	II	III	IV	V	VI
I	u_1	u_2	u_3	u_0,u_7	u_6	u_1
II	u_2	u_2	u_3	u_4	u_0,u_7	u_1
III	u_2	u_3	u_3	u_4	u_5	u_0,u_7
IV	u_0,u_7	u_3	u_4	u_4	u_5	u_6
V	u_1	u_0,u_7	u_4	u_5	u_5	u_6
VI	u_1	u_2	u_0,u_7	u_5	u_6	u_6

3 基于优化跟踪原理的电流控制新方法

传统空间矢量电流控制方法采用选择最优电压矢量的方法,虽然能在一定程度上减小开关频率,但是以降低参考电流跟踪速度为代价,当负荷电流变化较剧烈时,容易出现跟踪松弛的情况^[8,15-19]。为了解决这个问题,本文提出基于参考电流优化跟踪原理的电流控制新方法,在不增大逆变器开关频率的前提下,对电流跟踪速度进行了优化。

3.1 参考电流优化跟踪原理

由于有源电力滤波器的电压输出能力有限,因此应合理选择 u_{eq} 的方向,才能使 SAPF 的输出电流以最快的速度跟踪参考电流,把满足此要求的 u_{eq} 的

方向称为等效误差电压矢量的优化跟踪方向。确定优化跟踪方向的原则是:在所有幅值相同但方向不同的向量 u_{eq} 中,在优化跟踪方向上的 u_{eq} 能使误差电流矢量幅值降低最多。下面结合图 5 所示的矢量图来说明等效误差电压矢量的优化跟踪方向的确定方法。

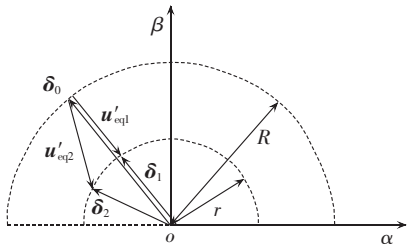


图 5 优化跟踪方向
Fig.5 Optimal tracking direction

在图 5 中, δ_0 的幅值为 R , u'_{eq1} 和 u'_{eq2} 是 u'_{eq} 的 2 个不同的取值, u'_{eq1} 的方向与 $-\delta_0$ 相同,在 u'_{eq1} 和 u'_{eq2} 的作用下, δ_0 分别变为幅值等于 r ($r < R$) 但方向不同的矢量 δ_1 和 δ_2 ,显然, u'_{eq2} 的幅值大于 u'_{eq1} 。A 点至小圆弧的最短路径是该点和圆心的连线与小圆弧的交点,在所有满足将 δ_0 的幅值变为 r 的 u'_{eq} 中,与 $-\delta_0$ 方向相同的 u'_{eq} 的幅值最小。 u'_{eq} 与 u_{eq} 幅值成正比关系,对应于 u'_{eq1} 的 u_{eq} 幅值最小,所以 $-\delta_0$ 方向是等效误差电压矢量的优化跟踪方向。由于 u_{eq} 的幅值与 δ 的幅值变化率成正比,因此 u_{eq} 的幅值越大, δ 的幅值变化量将越大。

综合上述分析,为了使 δ 的幅值减少最快,应使 u_{eq} 的方向与 $-\delta$ 相同,且幅值最大,定义此时的 u_{eq} 为优化跟踪等效误差电压矢量。

3.2 参考电流优化跟踪控制方法

基于优化跟踪原理,本文提出一种新的有源电力滤波器电流控制方法,即参考电流优化跟踪控制方法,其原理图如图 6 所示。

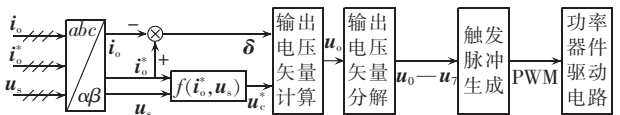


图 6 参考电流优化跟踪控制方法原理图
Fig.6 Schematic diagram of optimal reference current tracking

参考电流优化跟踪控制方法首先将逆变器输出电流、参考电流和 PCC 处电压通过 Clarke 变换调整至两相静止坐标系下,再通过式(5)计算参考电压矢量 u_c^* ,结合参考电流优化跟踪原理对输出电压矢量进行精确计算,并通过矢量分解与合成的方式,在一个开关周期内输出多个基本电压矢量来合成该输出电压矢量,以达到快速跟踪参考电流的目的。

由于逆变器电压输出能力有限,逆变器输出电

压矢量幅值不可能无穷大,因此在进行输出电压矢量计算时应充分考虑逆变器的实际电压输出能力。通过图 7 所示的输出电压矢量图可以求出优化跟踪等效误差电压矢量对应的输出电压矢量,图中 φ 、 θ 、 ϕ 分别表示 δ 、 u_o 和 u_c^* 的相角。

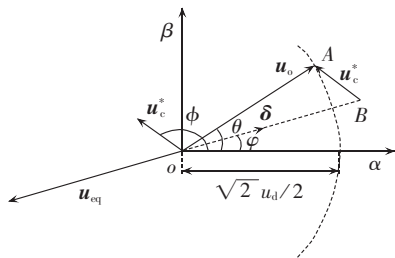


图 7 输出电压矢量计算原理图

Fig.7 Schematic diagram of output voltage vector calculation

从图 7 中可以看出,向量 u_c^* 的终点在 δ 正方向上与逆变器最大输出电压矢量圆的交点所对应的矢量 u_o 即为满足优化跟踪要求的输出电压矢量,该矢量的幅值为 $\sqrt{2} u_d / 2$,其相角可以通过图 7 中 $\triangle A o B$ 的三角函数关系得出。根据正弦定理容易得到:

$$\frac{\|u_c^*\|}{\sin(\theta-\varphi)} = \frac{\sqrt{2} u_d / 2}{\sin(\pi-\phi+\varphi)} \quad (10)$$

化简得:

$$\theta = \arcsin \frac{\sqrt{2} \|u_c^*\| \sin(\pi-\phi+\varphi)}{u_d} + \varphi \quad (11)$$

对应于图 7 中的 u_o 可以通过在单个开关周期内依次输出 u_1 、 u_2 和零矢量来合成。 u_1 、 u_2 和零矢量的作用时间可以通过如下公式求得:

$$\begin{cases} T_1 = T_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_2 = T_s \sin \theta \\ T_{0,7} = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (12)$$

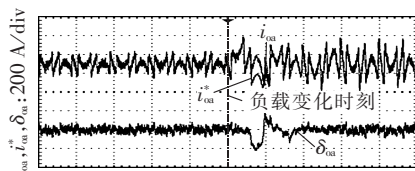
其中, T_s 为开关周期, T_1 、 T_2 和 $T_{0,7}$ 分别对应 u_1 、 u_2 和零矢量的作用时间。同理可以得出 u_o 位于其他扇区时基本电压空间矢量的作用时间计算方法。

4 实验分析

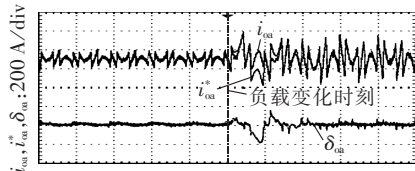
系统参数为:三相电源线电压为 380 V,频率为 50 Hz,负载为三相不可控整流电路带 2 组相同的阻感负荷,功率均为 50 kW,直流侧电容值为 5000 μ F,直流侧电压参考值为 700 V,逆变器输出电感为 0.3 mH。实验过程为:初始时刻只投入一组负荷,待有源电力滤波器输出电流稳定后,投入另一组负荷,负荷总功率为 100 kW。

为了说明本文所提方法在动态效果上的先进性,将第 2 节所示的传统方法设置为对照组。图 8、图 9 为实验波形,实验波形由智能型电网谐波监视分析及保护一体化装置^[20-23]得到。

直流侧电压波形对比图显示,与传统方法相比,



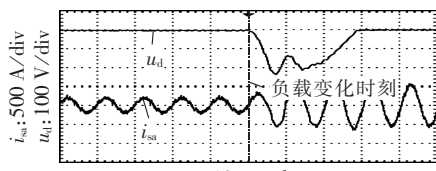
(a) 传统方法



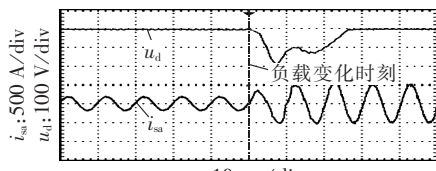
(b) 本文所提方法

图 8 SAPF 输出电流及误差实验波形对比图

Fig.8 Comparison of experimental waveforms between SAPF output current and error current



(a) 传统方法



(b) 本文所提方法

图 9 系统电流及直流侧电压实验波形对比图

Fig.9 Comparison of experimental waveforms between grid current and DC-side voltage

新方法对直流侧电容电压误差的阻尼程度更大,调整时间更短,能在较短的时间内达到稳定状态,同时具有更低的超调量,可以减少对直流侧电容的冲击。从系统电流、有源电力滤波器输出电流波形可以看出,新方法具有更快的电流响应速度,达到稳定状态所需时间比传统方法缩短半个工频电源周期左右,同时新方法在输出电流的稳态性能上也略优于传统方法,具有更低的电流误差。

5 结论

本文在分析有源电力滤波器空间矢量电流控制基本原理的基础上,结合参考电流优化跟踪策略,提出了一种有源电力滤波器电流控制新方法。理论分析和仿真实验表明,与基于最优电压矢量的传统滞环电流控制方法相比较,本文方法具有如下优点:

- 采用参考电流优化跟踪策略,能保证在单个开关周期内,使误差电流矢量幅值以最快的速度逼近于零,具有较高的电流跟踪速度;
- 充分考虑了逆变器的实际电压输出能力,避免出现逆变器失控的情况,提高了有源电力滤波器

系统的可靠性。

参考文献:

- [1] KWON B H, KIM T W, YOUM J H. A novel SVM-based hysteresis current controller[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(2): 297-307.
- [2] KWON B H, MIN B D, YOUM J H. An improved space-vector-based hysteresis current controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 752-760.
- [3] MAREI M I, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A. A new contribution into performance of active power filter utilizing SVM based HCC technique[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago, USA: IEEE, 2002: 1022-1026.
- [4] MOHSENI M, ISLAM S M. A new vector-based hysteresis current control scheme for three-phase PWM voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2299-2309.
- [5] 曾江,刁勤华,倪以信,等. 基于最优电压矢量的有源电力滤波器电流控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 25-31.
ZENG Jiang, DIAO Qinhu, NI Yixin, et al. A novel current control method for active power filter based on optimal voltage vector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 25-31.
- [6] ZENG Jiang, DIAO Qinhu, NI Yixin, et al. A novel current controller for active power filter based on optimal voltage space vector[C]//The Third International Power Electronics and Motion Control Conference Proceedings. Beijing, China: [s.n.], 2000: 686-691.
- [7] 郭自勇,周有庆,刘宏超,等. 一种基于电压空间矢量的有源电力滤波器滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 112-117.
GUO Ziyong, ZHOU Youqing, LIU Hongchao, et al. A novel hysteresis current control method for active power filter based on voltage space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 112-117.
- [8] 申张亮,郑建勇,梅军,等. 基于改进电压空间矢量调制的有源电力滤波器双滞环电流跟踪控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 8-14.
SHEN Zhangliang, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Double hysteresis control tracking control scheme for active power filter based on improved voltage space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 8-14.
- [9] 戎袁杰,徐长波,王荣蓉,等. 基于 SVPWM 的变参数三相并联 APF 的控制策略[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 1605-1613.
RONG Yuanjie, XU Changbo, WANG Rongrong, et al. Control strategy for parametric variations on three phase active power filter using SVPWM[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2009, 49(10): 1605-1613.
- [10] 姜俊峰,刘会金,陈允平,等. 有源电力滤波器的电压空间矢量双滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 82-86.
JIANG Junfeng, LIU Huijin, CHEN Yunping, et al. A novel double hysteresis current control method for active power filter with voltage space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 82-86.
- [11] 杨旭,王兆安. 一种新的准固定频率滞环 PWM 电流控制方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 24-28.
YANG Xu, WANG Zhaoan. A novel quasi-constant hysteresis PWM current mode control approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 24-28.
- [12] 洪峰,单任仲,王慧贞,等. 一种变环宽准恒频电流滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 115-119.
HONG Feng, SHAN Renzhong, WANG Huizhen, et al. A varied hysteresis-band current controller with fixed switching frequency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 115-119.
- [13] VODYAKHO O, KIM T, KWAK S, et al. Comparison of the space vector current controls for shunt active power filters[J]. IET Power Electronics, 2008, 2(6): 653-664.
- [14] BUSO S, MALESANI L, MATTAVELLI P. Comparison of current control techniques for active filter applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 722-729.
- [15] KAZMIERKOWSKI M P, MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 691-703.
- [16] RAMCHAND R, SIVAKUMAR K, DAS A, et al. Improved switching frequency variation control of hysteresis controlled voltage source inverter-fed IM drives using current error space vector[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(2): 219-231.
- [17] GOPAKUMAR K, RAMCHAND R, PATEL C, et al. Online computation of hysteresis boundary for constant switching frequency current error space vector based hysteresis controller for VSI fed IM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1521-1529.
- [18] 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: 60-66.
- [19] 查晓明,石峰,宫金武,等. 有源电力滤波器的频域能量变换模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 84-90.
ZHA Xiaoming, SHI feng, GONG Jinwu, et al. Frequency-domain energy converting model of shunt three-phase voltage source active power filter and application[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 84-90.
- [20] 林干,何志华,李正国,等. 智能型电网谐波监视分析及保护一体化装置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 64-66.
LIN Gan, HE Zhihua, LI Zhengguo, et al. An intelligent instrument for integrated harmonic detection, analysis and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 64-66.
- [21] 唐欣,李雄杰. 基于前馈控制的有源电力滤波器研制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 41-44.
TANG Xin, LI Xiongjie. Active power filter based on feed-forward control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 41-44.
- [22] 夏向阳,罗安,罗时武. 大功率单独注入式有源电力滤波器系统工程实现[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 115-118.
XIA Xiangyang, LUO An, LUO Shiwu. Application of high-capacity active power filter with single injection circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 115-118.
- [23] 夏向阳,罗安. 单独注入式有源电力滤波器的控制分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 58-63.
XIA Xiangyang, LUO An. Control of active power filter with single injection circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 58-63.

(下转第 93 页 continued on page 93)

by WAMS of Central China Power Grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 64-69.

[15] 周宏,李强,林涛,等. 特高压及 500 kV 区域联网的仿真复现与比较[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 153-159.

ZHOU Hong, LI Qiang, LIN Tao, et al. Simulation recurrence and comparison between UHV interconnection and 500 kV interconnection of regional power grids[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 153-159.

[16] 李强,林涛,高玉喜,等. 区域电网联网试验暂态过程的仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 85-90.

LI Qiang, LIN Tao, GAO Yuxi, et al. Simulation of transients in interconnection test of regional power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 85-90.

作者简介:

徐遐龄(1980-),女,湖北鄂州人,工程师,博士,研究方向为电力系统运行与控制、新能源发电与智能电网;

林涛(1969-),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护、新能源发电与智能电网、电能质量分析与控制(E-mail: tlin@whu.edu.cn);

高玉喜(1988-),男,安徽凤阳人,硕士,研究方向为电力系统运行与控制;

张帆(1987-),男,湖北孝感人,硕士,研究方向为电力系统运行与控制。

Warning of inter-area mode oscillation based on CBR and OAPID for interconnected power grids

XU Xialing¹, LIN Tao², GAO Yuxi², ZHANG Fan²

(1. Central China Electric Power Dispatching and Communication Center, Wuhan 430077, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A method of inter-area mode oscillation prediction based on CBR(Case-Based Reasoning) theory and OAPID(Oscillatory Active Power Increment Distribution) theory is proposed for interconnected power grids, which, based on the measurements of WAMS(Wide Area Measurement System), issues the warning of inter-area mode oscillation before low-frequency system oscillation occurs and provides the advice of system operating mode adjustment during system oscillation to improve system damping. Results of a test for a regional power grid according to its actual WAMS data demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power systems; stability; inter-area mode oscillation; case-based reasoning; OAPID; WAMS

(上接第 87 页 continued from page 87)

作者简介:

赵伟(1981-),男,山东泰安人,博士,主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿技术与应用、电能质量问题对电能计量的影响等方面的研究;

王文(1987-),男,湖北天门人,博士研究生,主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿以及电气节能技术等方面的研究(E-mail: wildwind6@126.com);

肖勇(1978-),男,山东靖州人,工程师,主要从事电能

计量、电能质量等方面的研究;

孟金岭(1986-),男,河南平顶山人,工程师,主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿技术与应用、电磁计量技术等方面的研究;

李洲(1987-),男,湖南邵阳人,硕士,主要从事电能质量监控系统和混合有源电力滤波技术等方面的研究;

罗安(1957-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要从事有源滤波、无功补偿及控制理论和技术等方面的教学与研究工作。

Space vector current control of shunt active power filter

ZHAO Wei¹, WANG Wen², XIAO Yong¹, MENG Jinling¹, LI Zhou², LUO An²

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A current control method based on the theory of voltage space vector analysis is proposed for SAPF(Shunt Active Power Filter). The optimal tracking of reference current is introduced, which ensures the amplitude of error current vector swiftly approaching to zero within a switching period. With full consideration of the actual voltage output capability, the output voltage vector of inverter is accurately calculated and composed by outputting multiple basic voltage vectors within a switching period, which ensures the differential of error current vector has the best direction and the largest amplitude. Therefore, the reference current is thus quickly followed while the inverter is controllable and the rapidness and reliability of control system are enhanced. Experimental results show the validity of the proposed control method.

Key words: shunt active power filter; electric current control; space vector; vector composition