



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102611117 B

(45) 授权公告日 2014. 09. 10

(21) 申请号 201210051133. 2

(22) 申请日 2012. 02. 29

(73) 专利权人 澳门大学

地址 中国澳门氹仔徐日昇寅公马路中国澳门大学科技学院

(72) 发明人 黄民聪 林智声 蔡威曦

(74) 专利代理机构 广东秉德律师事务所 44291  
代理人 闫有幸

(51) Int. Cl.

H02J 3/18 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101022218 A, 2007. 08. 22,

CN 101409450 A, 2009. 04. 15,

CN 101577427 A, 2009. 11. 11,

JP 特许第 3032046 号 B2, 2000. 02. 10,

JP 特开平 9-81251 A, 1997. 03. 28,  
高潮等. 串 / 并联级联混合型有源电力滤波器 APF 控制技术和电路拓扑结构研究. 《深圳信息职业技术学院学报》. 2008, 第 6 卷 (第 4 期),  
阮立飞等. 三相并联有源滤波器的控制策略研究. 《电气传动》. 2001, (第 3 期),

审查员 周权

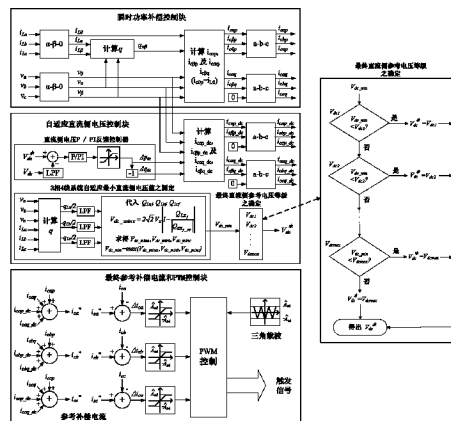
权利要求书3页 说明书9页 附图11页

(54) 发明名称

基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法

(57) 摘要

一种基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法, 适用于三相四线及三相三线之电力系统, 控制方法包括如下步骤: 首先, 通过每相负载无功功率  $Q_{Lx_f}$  计算出 LC-VSI 装置三相所需的最小直流侧电压, 根据最小直流侧电压, 自适应调节参考直流侧电压水平  $V_{dc}$ ; 然后, 通过三相的瞬时无功计算出每相需要的无功补偿电流及控制直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之补偿电流, 把上述两个电流相加得到 LC-VSI 装置最终的参考补偿电流  $i_{cx}^*$ ; 之后, 利用 PWM 方法控制逆变器输出补偿电流  $i_{cx}$  跟踪最终参考电流  $i_{cx}^*$ , 进行 LC-VSI 装置动态无功补偿及自适应直流侧电压之控制。本发明能自适应调节所需直流电容电压水平, 从而达到优化及减少有源部份运行时的损耗及噪声。



1. 一种基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,适用于三相四线及三相三线-制电力系统,其特征在于,包括如下步骤:首先,通过每相负载无功功率  $Q_{Lxf}$  计算出 LC-VSI 装置每相及三相所需的最小直流侧电压,根据最小直流侧电压,自适应调节参考直流侧电压水平  $V_{dc}^*$ ;然后,通过三相的瞬时无功计算出每相需要的无功补偿电流及控制直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之补偿电流,把上述两个电流相加得到 LC-VSI 装置最终的参考补偿电流  $i_{cx}^*$ ;之后,利用 PWM 方法控制逆变器输出补偿电流  $i_{cx}$  跟踪最终参考电流  $i_{cx}^*$ ,进行 LC-VSI 装置动态无功补偿及自适应直流侧电压之控制;

所述的基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,计算每相负载无功功率  $Q_{Lxf}$  的方法具体如下:

$$\begin{bmatrix} v_{x\alpha} \\ v_{x\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x(\omega t) \\ v_x(\omega t + \pi/2) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{Lx\alpha} \\ i_{Lx\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Lx}(\omega t + \theta_{Lx}) \\ i_{Lx}(\omega t + \pi/2 + \theta_{Lx}) \end{bmatrix}, x = a, b, c \text{ 相}, \omega = 2\pi f;$$

其中  $v_x$  为系统相电压,  $i_{Lx}$  为负载侧电流,  $f$  为系统基频频率,  $\theta_{Lx}$  为每相负载电流之相角;利用单相瞬时无功理论,可把每相  $v_x$  及  $i_{Lx}$  变换到正交之  $\alpha-\beta$  坐标系上,可得  $\alpha-\beta$  坐标系下  $\alpha$  轴及  $\beta$  轴瞬时系统相电压  $v_{x\alpha}$ ,  $v_{x\beta}$  及瞬时负载侧电流  $i_{Lx\alpha}$ ,  $i_{Lx\beta}$ ;

根据单相瞬时无功理论,每相的瞬时有功  $p_{Lx}$  及无功  $q_{Lx}$  为:

$$p_{Lx} = v_{x\alpha} i_{Lx\alpha} + v_{x\beta} i_{Lx\beta}, q_{Lx} = -v_{x\beta} i_{Lx\alpha} + v_{x\alpha} i_{Lx\beta}$$

把  $-q_{Lx}/2$  通过低通滤波器就能求得每相的负载无功功率  $Q_{Lxf}$  ;

上述控制方法中,获得每相所需补偿  $Q_{Lxf}$  的最小直流侧电压值  $V_{dc\_minx}$  的方法如下:

a) 三相四线 LC-VSI 装置:

对于一个固定的直流侧电压  $V_{dcU} = V_{dcL} = 0.5V_{dc}$  和调制指数  $m$  设为  $m \approx 1$ ,每相所需补偿负载无功功率  $Q_{Lxf}$  之最小直流侧电压值为:

$$V_{dc\_minx} = 2\sqrt{2}V_x \left| 1 - \frac{Q_{Lxf}}{Q_{cx\_PF}} \right|;$$

其中  $V_x$  为系统相电压有效值,  $Q_{cx\_PF} = \frac{V_x^2}{X_{Cc} - X_{Lc}}$  为容性无源支路 (PF) 所提供的无功补偿功率,  $X_{Cc}$  及  $X_{Lc}$  为容性无源支路 (PF) 中电容器  $C_c$  及电感器  $L_c$  之基频电容抗值及电感抗值,  $X_{Cc} = \frac{1}{2\pi f C_c}$  及  $X_{Lc} = 2\pi f L_c$ ;

b) 三相三线 LC-VSI 装置:

对于一个固定的直流侧电压  $V_{dc}$  和调制指数  $m$  设为  $m \approx 1$ ,其每相所需补偿负载无功功率  $Q_{Lxf}$  之最小直流侧电压值表达式则为:

$$V_{dc\_minx} = \frac{3\sqrt{2}}{2} V_x \left| 1 - \frac{Q_{Lx_f}}{Q_{Cx_f\_PF}} \right|$$

2. 根据权利要求 1 所述的基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,其特征在于,LC-VSI 装置三相所需的最小直流侧电压  $V_{dc\_min}$  通过下式得出:

$$V_{dc\_min} = \max(V_{dc\_mina}, V_{dc\_minb}, V_{dc\_minc}), x = a, b, c \text{ 相}.$$

3. 根据权利要求 2 所述的基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,其特征在于,所述自适应调节参考直流侧电压水平  $V_{dc}^*$  的具体方法为:参考直流侧电压  $V_{dc}^*$  分为  $n$  个电压等级:  $V_{dc1}, V_{dc2}, \dots, V_{dcmax}, V_{dc1} < V_{dc2} < \dots < V_{dcmax}, n=1, 2, \dots, Max$ , 来控制,当三相所需的最小直流侧电压值  $V_{dc\_min}$  低于最低电压等级  $V_{dc1}$ , 最终参考直流侧电压  $V_{dc}^* = V_{dc1}$ ; 否则比较下一个较高电压等级  $V_{dc2}$ , 重复该步骤。

4. 根据权利要求 3 所述的基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,其特征在于,计算每相需要的无功补偿电流的方法如下:

基于 Clarke 变换,首先把 a-b-c 坐标系下的三相瞬时系统电压  $v_a, v_b, v_c$  及瞬时负载电流  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$  变换到  $\alpha - \beta - 0$  坐标系上,得出  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴及 0 轴瞬时系统相电压  $v_\alpha, v_\beta, v_0$  及瞬时负载侧电流  $i_{L\alpha}, i_{L\beta}, i_{L0}$ ;

根据瞬时无功理论,  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下瞬时无功  $q_{\alpha\beta}$  为:

$$q_{\alpha\beta} = -v_\beta i_{L\alpha} + v_\alpha i_{L\beta}$$

在  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下补偿无功所需要的补偿电流  $i_{c\alpha}, i_{c\beta}, i_{c0}$  可以由下式计算出:

$$i_{c\alpha} = i_{cap} + i_{caq} = 0 + \frac{-q_{\alpha\beta} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2}, \quad i_{c\beta} = i_{c\beta p} + i_{c\beta q} = 0 + \frac{q_{\alpha\beta} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2}, \quad i_{c0} = i_{c0p} = i_{L0}$$

其中  $v_{\alpha\beta}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ,  $i_{c\alpha p}$  及  $i_{c\alpha q}$  为  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c\beta p}$  及  $i_{c\beta q}$  为  $\beta$  轴瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c0p}$  为 0 轴瞬时有功补偿电流;之后,通过反 Clarke 变换,得到在 a-b-c 坐标系下补偿无功所需要的每相补偿电流  $i_{ca_q}, i_{cb_q}, i_{cc_q}, i_{cx_q} = i_{cxp} + i_{cxq}, x = a, b, c$ ;

其中  $i_{cxp}$  及  $i_{cxq}$  为 a-b-c 坐标系下每相 ( $x = a, b, c$ ) 瞬时有功及无功补偿电流。

5. 根据权利要求 4 所述的基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,其特征在于,在  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下控制直流侧电压  $V_{dc}$  跟踪参考直流侧电压  $V_{dc}^*$  之每相补偿电流由下式计算得出:

$$i_{c\alpha\_dc} = i_{cap\_dc} + i_{caq\_dc} = \frac{\Delta p_{dc} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} + \frac{\Delta q_{dc} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2},$$

$$i_{c\beta\_dc} = i_{c\beta p\_dc} + i_{c\beta q\_dc} = \frac{\Delta p_{dc} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2} + \frac{-\Delta q_{dc} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2},$$

$$i_{c0\_dc} = 0$$

其中  $\Delta p_{dc} = -\Delta q_{dc} = k_p (V_{dc}^* - V_{dc})$ ,  $k_p$  为增益,  $i_{c\alpha p\_dc}$  及  $i_{c\alpha q\_dc}$  为  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c\beta p\_dc}$  及  $i_{c\beta q\_dc}$  为  $\beta$  轴控制直流侧电压

之瞬时有功及无功补偿电流;通过反 Clarke 变换,就能得到在 a-b-c 坐标系下控制直流侧电压所需要的每相补偿电流  $i_{ca\_dc}, i_{cb\_dc}, i_{cc\_dc}, i_{cx\_dc} = i_{cxp\_dc} + i_{cxq\_dc}, x = a, b, c$ ;

其中  $i_{cxp\_dc}$  及  $i_{cxq\_dc}$  为 a-b-c 坐标系下每相 ( $x = a, b, c$ ) 控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流。

6. 根据权利要求 5 所述的基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,其特征在于,最终参考补偿电流  $i_{cx}^*$  的确定方法为:把瞬时无功计算出每相需要的无功补偿电流  $i_{cx\_q}$  及控制直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之补偿电流  $i_{cx\_dc}$  相加得到 LC-VSI 装置最终的参考补偿电流  $i_{cx}^*$ 。

## 基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于 LC-耦合电压型逆变器结构的补偿装置的无功补偿控制方法,属于电气工程中的变流技术领域。

### 背景技术

[0002] 传统的无功补偿手段有机械投入的并联电容器及调相机等,但它们都存在着一些问题,如并联电容器运行不便,容易发生共振,在系统电压降低时不能有效地提供无功支持等缺点。而调相机虽然动态性能较好,运行范围也较宽,但是由于包含转动部分,其设备及运行成本都较高。柔性交流输配电(FACTS/DFACTS)技术的出现给电力系统带来了新的控制技术和应用手段。静态无功补偿器(Static Var Compensator, SVC),静态同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)和有源电力滤波器(APF)都是可用来进行无功补偿的重要 FACTS/DFACTS 设备,它们具有高动态响应速度,宽大补偿范围,能抑制谐振问题,但其初次和运行成本高。

[0003] 把 LC-耦合电压型逆变器(LC-VSI)应用于 STATCOM 和 APF 就构成 LC-耦合 STATCOM(LC-STATCOM)和 LC-耦合混合有源电力滤波器(LC-HAPF),如“通过容性阻抗连接的静态同步无功补偿装置及控制方法”(中国发明专利,公开日:2009年4月15日,公开号:CN101409450A)、“中压混合有源电力滤波器”(中国发明专利,公开日:2007年8月22日,公开号 CN101022218A)、“混合有源电力滤波器及其控制方法”(中国发明专利,公开日:2007年5月30日,公开号 CN1972060A)。LC-STATCOM 和 LC-HAPF 能使得电压型逆变器(VSI)的输出电压可远低于系统电压,因而大大减小逆变器直流部分的电压,降低了 LC-STATCOM 和 LC-HAPF 无功补偿的成本和开关损耗。

[0004] LC-STATCOM 和 LC-HAPF 在运作时的参考直流侧电压都是固定不变的,但当无源 LC 部分提供的无功功率差不多能全补偿负载无功功率时,LC-STATCOM 和 LC-HAPF 有源部分所需补偿无功的直流侧电压要求可以很低,若该 LC-STATCOM 和 LC-HAPF 仍然运作于设计之固定直流侧电压水平中,因而增加了开关组件的损耗及噪声,降低 LC-STATCOM 和 LC-HAPF 的效率及补偿效果不理想。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是为了使基于 LC-耦合电压型逆变器(LC-VSI)结构的补偿装置,如 LC-STATCOM 和 LC-HAPF,能对电力系统作动态无功补偿,且能在运行时优化及减少开关组件的损耗及噪声,提高装置的效率及补偿效果,提出一种在不同负载无功功率范围下自适应调节直流侧电压 LC-VSI 装置的无功补偿控制方法。

[0006] 为了实现以上目的,本发明提供一种基于自适应调节直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,适用于三相四线及三相三线之电力系统,控制方法包括如下步骤:首先,通过每相负载无功功率  $Q_{Lxf}$  计算出 LC-VSI 装置三相所需的最小直流侧电压,根据最小

直流侧电压,自适应调节参考直流侧电压水平  $V_{dc}^*$ ;然后,通过三相的瞬时无功计算出每相需要的无功补偿电流及控制直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之补偿电流,把上述两个电流相加得到 LC-VSI\* 装置最终的参考补偿电流  $i_{cx}$ ;之后,利用 PWM 方法控制逆变器输出补偿电流  $i_{cx}^*$  跟踪最终参考电流  $i_{cx}$ ,进行 LC-VSI 装置动态无功补偿及自适应直流侧电压之控制。

[0007] 上述控制方法中,计算每相负载无功功率  $Q_{Lxf}$  的方法具体如下:

$$[0008] \quad \begin{bmatrix} v_{x\alpha} \\ v_{x\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x(\omega t) \\ v_x(\omega t + \pi/2) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{Lx\alpha} \\ i_{Lx\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Lx}(\omega t + \theta_{Lx}) \\ i_{Lx}(\omega t + \pi/2 + \theta_{Lx}) \end{bmatrix}, \quad x = a, b, c \text{ 相}, \quad \omega = 2\pi f$$

[0009] 其中  $v_x$  为系统相电压,  $i_{Lx}$  为负载侧电流,  $f$  为系统基频频率,  $\theta_{Lx}$  为每相负载电流之相角;利用单相瞬时无功理论,可把每相  $v_x$  及  $i_{Lx}$  变换到正交之  $\alpha - \beta$  坐标系上,可得  $\alpha - \beta$  坐标系下  $\alpha$  轴及  $\beta$  轴瞬时系统相电压  $v_{x\alpha}$ ,  $v_{x\beta}$  及瞬时负载侧电流  $i_{Lx\alpha}$ ,  $i_{Lx\beta}$ ;

[0010] 根据单相瞬时无功理论,每相的瞬时有功  $p_{Lx}$  及无功  $q_{Lx}$  为:

$$[0011] \quad p_{Lx} = v_{x\alpha} i_{Lx\alpha} + v_{x\beta} i_{Lx\beta}, \quad q_{Lx} = -v_{x\beta} i_{Lx\alpha} + v_{x\alpha} i_{Lx\beta}$$

[0012] 把  $-q_{Lx}/2$  通过低通滤波器就能求得每相的负载无功功率  $Q_{Lxf}$ ;

[0013] 上述控制方法中,获得每相所需补偿  $Q_{Lxf}$  的最小直流侧电压值  $V_{dc\_minx}$  的方法如下:

[0014] a) 三相四线 LC-VSI 装置:

[0015] 对于一个固定的直流侧电压  $V_{dcU} = V_{dcL} = 0.5V_{dc}$  和调制指数  $m$  设为  $m = 1$ ,每相所需补偿负载无功功率  $Q_{Lxf}$  之最小直流侧电压值为:

$$[0016] \quad V_{dc\_minx} = 2\sqrt{2}V_x \left| 1 - \frac{Q_{Lxf}}{Q_{cx\_PF}} \right|, \quad x = a, b, c \text{ 相}$$

[0017] 其中  $V_x$  为系统相电压有效值,  $Q_{cx\_PF} = \frac{V_x^2}{X_{Cc} - X_{Lc}}$  为 LC 无源支路 (PF) 所提供的无功补偿功率,  $X_{Cc}$  及  $X_{Lc}$  为无源支路 (PF) 中电容器  $C_c$  及电感器  $L_c$  之基频电容抗值及电感抗值,  $X_{Cc} = \frac{1}{2\pi f C_c}$  及  $X_{Lc} = 2\pi f L_c$ ;

[0018] b) 三相三线 LC-VSI 装置:

[0019] 对于一个固定的直流侧电压  $V_{dc}$  和调制指数  $m$  假为  $m = 1$ ,其每相所需补偿负载无功功率  $Q_{Lxf}$  之最小直流侧电压值表达式则为:

$$[0020] \quad V_{dc\_minx} = \frac{3\sqrt{2}}{2}V_x \left| 1 - \frac{Q_{Lxf}}{Q_{cx\_PF}} \right|, \quad x = a, b, c \text{ 相}.$$

[0021] 上述控制方法中, LC-VSI 装置三相所需的最小直流侧电压  $V_{dc\_min}$  通过下式得出:

$$[0022] \quad V_{dc\_min} = \max(V_{dc\_mina}, V_{dc\_minb}, V_{dc\_minc}), \quad x = a, b, c \text{ 相。}$$

[0023] 上述控制方法中, 所述自适应调节参考直流侧电压水平  $V_{dc}^*$  的具体方法为: 参考直流侧电压  $V_{dc}^*$  分为  $n$  个电压等级:  $V_{dc1}, V_{dc2}, \dots, V_{dcmax}, V_{dc1} < V_{dc2} < \dots < V_{dcmax}, n=1, 2, \dots, \text{Max}$ , 来控制, 当三相所需的最小直流侧电压值  $V_{dc\_min}$  低于最低电压等级  $V_{dc1}$ , 最终参考直流侧电压  $V_{dc}^* = V_{dc1}$ ; 否则比较下一个较高电压等级  $V_{dc2}$ , 重复该步骤。

[0024] 上述控制方法中, 计算每相需要的无功补偿电流的方法如下:

[0025] 基于 Clarke 变换, 首先把 a-b-c 坐标系下的三相瞬时系统电压  $v_a, v_b, v_c$  及瞬时负载电流  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$  变换到  $\alpha - \beta - 0$  坐标系上, 得出  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴及 0 轴瞬时系统相电压  $v_\alpha, v_\beta, v_0$  及瞬时负载侧电流  $i_{L\alpha}, i_{L\beta}, i_{L0}$ ;

[0026] 根据瞬时无功理论, 瞬时无功  $q_{\alpha\beta}$  为:

$$[0027] \quad q_{\alpha\beta} = -v_\beta i_{L\alpha} + v_\alpha i_{L\beta}$$

[0028] 在  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下补偿无功所需要的补偿电流  $i_{c\alpha}, i_{c\beta}, i_{c0}$  可以由下式计算出:

[0029]

$$i_{c\alpha} = i_{cap} + i_{caq} = 0 + \frac{-q_{\alpha\beta} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2}, \quad i_{c\beta} = i_{c\beta p} + i_{c\beta q} = 0 + \frac{q_{\alpha\beta} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2}, \quad i_{c0} = i_{c0p} = i_{L0}$$

[0030] 其中  $v_{\alpha\beta}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ,  $i_{c\alpha p}$  及  $i_{c\alpha q}$  为  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c\beta p}$  及  $i_{c\beta q}$  为  $\beta$  轴瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c0p}$  为 0 轴瞬时有功补偿电流; 之后, 通过反 Clarke 变换, 得到在 a-b-c 坐标系下补偿无功所需要的每相补偿电流  $i_{ca\_q}, i_{cb\_q}, i_{cc\_q}$ ,  $i_{cx\_q} = i_{cxp} + i_{cxq}, x = a, b, c$ ;

[0031] 其中  $i_{cxp}$  及  $i_{cxq}$  为 a-b-c 坐标系下每相 ( $x = a, b, c$ ) 瞬时有功及无功补偿电流。

[0032] 上述控制方法中, 在  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下控制直流侧电压  $V_{dc}$  跟踪参考直流侧电压  $V_{dc}^*$  之每相补偿电流由下式计算得出:

$$[0033] \quad i_{c\alpha\_dc} = i_{cap\_dc} + i_{caq\_dc} = \frac{\Delta p_{dc} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} + \frac{\Delta q_{dc} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2},$$

$$[0034] \quad i_{c\beta\_dc} = i_{c\beta p\_dc} + i_{c\beta q\_dc} = \frac{\Delta p_{dc} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2} + \frac{-\Delta q_{dc} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2},$$

$$i_{c0\_dc} = 0$$

[0035] 其中  $\Delta p_{dc} = -\Delta q_{dc} = kp(V_{dc}^* - V_{dc})$ ,  $kp$  为增益,  $i_{c\alpha p\_dc}$  及  $i_{c\alpha q\_dc}$  为  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c\beta p\_dc}$  及  $i_{c\beta q\_dc}$  为  $\beta$  轴控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流; 通过反 Clarke 变换, 就能得到在 a-b-c 坐标系下控制直流侧电压所需要的每相补偿电流  $i_{ca\_dc}, i_{cb\_dc}, i_{cc\_dc}, i_{cx\_dc} = i_{cxp\_dc} + i_{cxq\_dc}, x = a, b, c$

[0036] 其中  $i_{cxp\_dc}$  及  $i_{cxq\_dc}$  为 a-b-c 坐标系下每相控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流。\*

[0037] 上述控制方法中, 最终参考补偿电流  $i_{cx}$  的确定方法为: 把瞬时无功计算出每相需要的无功补偿电流  $i_{cx\_q}$  及控制直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之补偿电流  $i_{cx\_dc}$  相加得到 LC-VSI 装置最终的参考补偿电流  $i_{cx}^*$ 。

[0038] 本发明的有益效果在于：

[0039] (1) 因电力系统负载的无功功率是动态变化的，自适应直流侧电压 LC-VSI 装置的有源和无源部分能共同在一定范围内提供无功补偿功率。

[0040] (2) 因应不同的负载无功功率情况，LC-VSI 装置能自适应调节所需直流电容电压水平，从而达到优化及减少有源部份运行时的损耗及噪声，提高 LC-VSI 装置的效率及补偿效果。

[0041] (3) 本发明提出的可调节直流侧电压来优化及减少系统之开关组件的损耗及噪声，提高系统效率及补偿效果之创新点，该创新点亦能实践于其他三相三线或三相四线，两电平至多电平之柔性交流输配电系统 (FACTS/DFACTS) 装置。

### 附图说明

[0042] 图 1 为本发明提出的自适应直流侧电压 LC-VSI 装置结构示意图。

[0043] 图 2 为本发明提供的 LC-VSI 装置单相基频等效电路模型。

[0044] 图 3 为 LC-VSI 装置在感性负载下的稳态单相基频相量图：a 为全补偿，b 为欠补偿及，c 为过补偿。

[0045] 图 4 为本发明提供的自适应直流侧电压 LC-VSI 装置控制框图。

[0046] 图 5 为仿真例中采用两电平三桥臂中分 LC-VSI 装置结构图。

[0047] 图 6 为仿真例中自适应直流侧电压 LC-VSI 装置在不同感性负载下整个动态补偿过程及其波形图：a 为负载侧无功功率  $Q_{Lx_f}$ ，b 为直流侧电压  $V_{dcU}$ ,  $V_{dcL}$ ，c 为系统侧无功功率  $Q_{sx_f}$ ，d 为 LC-VSI 装置注入无功功率  $Q_{cx_f}$  (状况 1 至状况 6)。

[0048] 图 7 为仿真例中 LC-VSI 装置补偿后 A 相电压和电流波形图于：a 为负载侧，b 为系统侧 (当感性负载 1 接上)。

[0049] 图 8 为仿真例中 LC-VSI 装置补偿后 A 相电压和电流波形图于：a 为负载侧，b 为系统侧 (当感性负载 1 及 2 接上)。

[0050] 图 9 为仿真例中 LC-VSI 装置补偿后 A 相电压和电流波形图于：a 为负载侧，b 为系统侧 (当感性负载 1, 2 及 3 接上)。

[0051] 图 10 为仿真例中固定直流侧电压水平 LC-VSI 装置 ( $V_{dcU}$ ,  $V_{dcL}=120V$ ) 在不同感性负载下整个仿真动态补偿过程及其波形图：a 为负载侧无功功率  $Q_{Lx_f}$ ，b 为直流侧电压  $V_{dcU}$ ,  $V_{dcL}$ ，c 为电源侧无功功率  $Q_{sx_f}$ ，d 为 LC-VSI 装置注入无功功率  $Q_{cx_f}$  (状况 1 至状况 6)。

### 具体实施方式

[0052] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述。

[0053] 如图 1 所示，自适应直流侧电压 LC-VSI 装置包括：基于全控型电力电子器件 (GTO 或 IGBT) 的电压型逆变器、连接逆变器和电力系统的 LC 无源支路、以及控制装置。所述 LC 无源支路均包括串联电容器  $C_c$  和电感器  $L_c$ 。根据图 2 的 LC-VSI 装置单相基频等效电路模型，可得 LC-VSI 装置在感性负载下的三种稳态单相基频相量图，如图 3 所示。当选取适当



的 LC 无源支路阻抗值,图 3 所示 LC-VSI 装置电压型逆变器的输出电压将可大大低于系统电压,这使得电压型逆变器直流电容部分的电压大大降低,相应的逆变器所选用的开关组件的耐压值可以降低,从而减小装置的成本和开关损耗。

[0054] 针对本发明提出的自适应直流侧电压的 LC-VSI 装置无功补偿控制方法,其所采用的控制方法包括:首先,计算每相负载无功功率  $Q_{Lx_f}$  ( $Q_{Lx_f}$  可通过单相瞬时无功及低通滤波器求得);然后,由每相的  $Q_{Lx_f}$  来确定 LC-VSI 装置每相及三相所需补偿  $Q_{Lx_f}$  的最小直流侧电压值 ( $V_{dc\_minx}, V_{dc\_min}$ ),从而进行自适应控制。实际上,因负载无功功率是时变的,为了减少直流侧电压时刻波动对 LC-VSI 装置补偿性能及效果之影响,逆变器参考直流侧电压  $V_{dc}^*$  亦特意分为  $n$  个电压等级 ( $V_{dc1}, V_{dc2}, \dots, V_{dcmax}, V_{dc1} < V_{dc2} < \dots < V_{dcmax}, n=1, 2, \dots, max$ ) 来控制,如图 4 所示。当三相所需的最小直流侧电压值  $V_{dc\_min}$  低于最低电压等级  $V_{dc1}$ ,最终参考直侧电压  $V_{dc}^* = V_{dc1}$ ;否则,比较下一个较高电压等级  $V_{dc2}$ ,并重复该步骤,如图 4 所示。

[0055] 利用三相瞬时无功方法计算出每相需要的无功补偿电流及控制直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之补偿电流,把这两个电流加起来就是最终的参考补偿电流  $i_{cx}^*$ ,从而进行动态补偿无功及自适应直流侧电压之控制,如图 4 所示。基于 LC-VSI 装置的结构图 1 所示,该方法的实现过程如下:

[0056] (一) 计算出每相负载无功功率  $Q_{Lx_f}$

[0057] 通过  $\pi/2$  领先或滞后相角之变换考虑,可把每相瞬时系统电压  $v_a, v_b, v_c$  及瞬时负载电流  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$  变换到  $\alpha-\beta$  坐标系,得出  $\alpha-\beta$  坐标系下  $\alpha$  轴及  $\beta$  轴瞬时系统相电压  $v_{x\alpha}, v_{x\beta}$  及瞬时负载电流  $i_{Lx\alpha}, i_{Lx\beta}$  如下:

$$[0058] \quad \begin{bmatrix} v_{x\alpha} \\ v_{x\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x(\omega t) \\ v_x(\omega t + \pi/2) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{Lx\alpha} \\ i_{Lx\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Lx}(\omega t + \theta_{Lx}) \\ i_{Lx}(\omega t + \pi/2 + \theta_{Lx}) \end{bmatrix}, \quad x = a, b, c \text{ 相}, \omega = 2\pi f$$

[0059]  $f$  为系统基频频率,  $\theta_{Lx}$  为每相负载电流之相角;根据单相瞬时无功理论,每相的瞬时有功  $p_{Lx}$  及无功  $q_{Lx}$  为:

$$[0060] \quad p_{Lx} = v_{x\alpha} i_{Lx\alpha} + v_{x\beta} i_{Lx\beta}, \quad q_{Lx} = -v_{x\beta} i_{Lx\alpha} + v_{x\alpha} i_{Lx\beta}$$

[0061] 把  $-q_{Lx}/2$  通过低通滤波器就能求得每相的负载无功功率  $Q_{Lx_f}$ 。

[0062] (二) 计算出每相所需补偿  $Q_{Lx_f}$  的最小直流侧电压值  $V_{dc\_minx}$

[0063] a) 三相四线 LC-VSI 装置:

[0064] 对于一个固定的直流侧电压  $V_{dcU} = V_{dcL} = 0.5V_{dc}$  和调制指数  $m$  设为  $m = 1$ ,  $R_{V_{dc}}$  代表直流侧不同电压水平  $V_{dc}$  与系统相电压  $V_x$  有效值之间的电压比,可表示为:

$$[0065] \quad R_{V_{dc}} = \pm \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}V_x}, \quad x = a, b, c \text{ 相};$$

[0066] LC-VSI 装置对于负载  $Q_{Lx_f}$  之无功功率补偿范围为:

$$[0067] \quad \left| Q_{cx_f\_PF} (1 - |R_{V_{dc}}|) \right| \leq Q_{Lx_f} \leq \left| Q_{cx_f\_PF} (1 + |R_{V_{dc}}|) \right|, \quad x = a, b, c \text{ 相};$$

[0068] 其中  $Q_{cx\_f\_PF} = \frac{V_x^2}{X_{Cc} - X_{Lc}}$  为 LC 无源支路 (PF) 所提供的无功补偿功率,  $X_{Cc}$  及  $X_{Lc}$

为无源支路 (PF) 中电容器  $C_c$  及电感器  $L_c$  之基频电容抗值及电感抗值,  $X_{Cc} = \frac{1}{2\pi f C_c}$  及  $X_{Lc}$

$= 2\pi f L_c$ ;

[0069] 通过设置  $Q_{Lx\_f} \approx \left| Q_{cx\_f\_PF} (I - |R_{V_{dc}}|) \right| \approx \left| Q_{cx\_f\_PF} (I + |R_{V_{dc}}|) \right|$ , 可得出每相所需补偿负载无功功率  $Q_{Lx\_f}$  之最小直流侧电压值:

$$[0070] \quad V_{dc\_minx} = 2\sqrt{2} V_x \left| I - \frac{Q_{Lx\_f}}{|Q_{cx\_f\_PF}|} \right|$$

[0071] b) 三相三线 LC-VSI 装置:

[0072] 而对于一个固定的直流侧电压  $V_{dc}$  和调制指数  $m$  设为  $m = 1$ , 其每相所需补偿负载无功功率  $Q_{Lx\_f}$  之最小直流侧电压值表达式则为:

$$[0073] \quad V_{dc\_minx} = \frac{3\sqrt{2}}{2} V_x \left| I - \frac{Q_{Lx\_f}}{|Q_{cx\_f\_PF}|} \right|$$

[0074] 以上两式可应用于三相四线及三相三线 LC-VSI 装置之自适应调节直流侧电压控制算法, 从这两式可见当无源部分提供的无功功率  $Q_{cx\_f\_PF}$  能全补偿负载无功功率  $Q_{Lx\_f}$  时, 可得最小直流侧电压值为  $V_{dc\_minx} = 0$ 。此外, 当它们之间的无功功率差异越大, 所需之直流侧电压水平要求越高, 反之亦然。每当每相负载无功功率  $Q_{Lx\_f}$  能计算出时, 通过上式便能求得每相相应所需的最小直流侧电压值  $V_{dc\_minx}$ 。

[0075] (三) 自适应调节逆变器参考直流侧电压水平确定方法

[0076] 通过计算每相所需补偿  $Q_{Lx\_f}$  的最小直流侧电压值  $V_{dc\_minx}$ , LC-VSI 装置三相所需的最小直流侧电压  $V_{dc\_min}$  可以通过下式选择得出:

[0077]  $V_{dc\_min} = \max(V_{dc\_mina}, V_{dc\_minb}, V_{dc\_minc})$ ,  $x = a, b, c$  相;

[0078] 根据以上公式, 就能实践 LC-VSI 装置因应不同负载无功范围下, 自适应调节参考直流侧电压水平  $V_{dc}^*$ 。

[0079] (四) 逆变器参考直流侧电压等级之确定

[0080] 实际上, 因负载无功功率是时变的, 为了减少直流侧电压时刻波动对 LC-VSI 装置补偿性能及效果之影响, 逆变器参考直流侧电压  $V_{dc}^*$  亦特意分为  $n$  个电压等级 ( $V_{dc1}, V_{dc2}, \dots, V_{dcmax}$ ,  $V_{dc1} < V_{dc2} < \dots < V_{dcmax}$ ,  $n=1, 2, \dots, max$ ) 来控制, 如图 4 所示。当三相所需的最小直流侧电压值  $V_{dc\_min}$  低于最低电压等级  $V_{dc1}$ , 最终参考直流侧电压  $V_{dc}^* = V_{dc1}$ ; 否则, 比较下一个较高电压等级  $V_{dc2}$ , 重复该步骤, 如图 4 所示。然后通过以下提及的直流侧电压控制方法, 就达到自动调节直流侧电压水平的功能。

[0081] (五) 计算出每相需要的无功补偿电流

[0082] 基于 Clarke 变换, 首先把 a-b-c 坐标系下的三相瞬时系统电压  $v_a, v_b, v_c$  及瞬时负载电流  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$  变换到  $\alpha - \beta - 0$  坐标系上, 得出  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴及 0 轴瞬时系统相电压  $v_\alpha, v_\beta, v_0$  及瞬时负载电流  $i_{L\alpha}, i_{L\beta}, i_{L0}$ ;

[0083] 根据瞬时无功理论, 瞬时无功  $q_{\alpha\beta}$  为:

$$[0084] \quad q_{\alpha\beta} = -v_\beta i_{L\alpha} + v_\alpha i_{L\beta}$$

[0085] 在  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下补偿无功所需要的补偿电流  $i_{c\alpha}, i_{c\beta}, i_{c0}$  可以由下式计算出:

[0086]

$$i_{c\alpha} = i_{c\alpha p} + i_{c\alpha q} = 0 + \frac{-q_{\alpha\beta} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2}, \quad i_{c\beta} = i_{c\beta p} + i_{c\beta q} = 0 + \frac{q_{\alpha\beta} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2}, \quad i_{c0} = i_{c0 p} = i_{L0}$$

[0087] 其中  $v_{\alpha\beta}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ,  $i_{c\alpha p}$  及  $i_{c\alpha q}$  为  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c\beta p}$  及  $i_{c\beta q}$  为  $\beta$  轴瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c0 p}$  为 0 轴瞬时有功补偿电流;

[0088] 通过反 Clarke 变换, 就能得到在 a-b-c 坐标系下补偿无功所需要的每相补偿电流  $i_{ca_q}, i_{cb_q}, i_{cc_q}, i_{cx_q} = i_{cxp} + i_{cxq}$ ,  $x = a, b, c$ , 如图 4 所示, 其中  $i_{cxp}$  及  $i_{cxq}$  为 a-b-c 坐标系下每相瞬时有功及无功补偿电流。

[0089] (六) 直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之控制方法

[0090] 而在  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下控制直流侧电压  $V_{dc}$  跟踪参考值  $V_{dc}^*$  之每相补偿电流亦可由下式计算出:

$$[0091] \quad i_{c\alpha\_dc} = i_{c\alpha p\_dc} + i_{c\alpha q\_dc} = \frac{\Delta p_{dc} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} + \frac{\Delta q_{dc} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2},$$

$$[0092] \quad i_{c\beta\_dc} = i_{c\beta p\_dc} + i_{c\beta q\_dc} = \frac{\Delta p_{dc} v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2} + \frac{-\Delta q_{dc} v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2},$$

$$i_{c0\_dc} = 0$$

[0093] 其中  $\Delta p_{dc} = -\Delta q_{dc} = k_p (V_{dc}^* - V_{dc})$ ,  $k_p$  为增益,  $i_{c\alpha p\_dc}$  及  $i_{c\alpha q\_dc}$  为  $\alpha - \beta - 0$  坐标系下  $\alpha$  轴控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流,  $i_{c\beta p\_dc}$  及  $i_{c\beta q\_dc}$  为  $\beta$  轴控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流; 通过反 Clarke 变换, 就能得到在 a-b-c 坐标系下控制直流侧电压所需要的每相补偿电流  $i_{ca\_dc}, i_{cb\_dc}, i_{cc\_dc}, i_{cx\_dc} = i_{cxp\_dc} + i_{cxq\_dc}$ ,  $x = a, b, c$ , 如图 4 所示, 其中  $i_{cxp\_dc}$  及  $i_{cxq\_dc}$  为 a-b-c 坐标系下每相控制直流侧电压之瞬时有功及无功补偿电流。这直流侧电压控制法亦适用于实践 LC-VSI 装置起动直流电容自我充电至参考电压值之功能。

[0094] (七) 最终参考补偿电流  $i_{cx}^*$  之确定

[0095] 把瞬时无功计算出每相需要的无功补偿电流  $i_{cx_q}$  及控制直流侧电压跟踪自适应参考直流侧电压值之补偿电流  $i_{cx\_dc}$  加起来就是 LC-VSI 装置最终的参考补偿电流  $i_{cx}^*$ , 利用 PWM 方法控制逆变器输出补偿电流  $i_{cx}$  跟踪最终参考电流  $i_{cx}^*$ , 从而进行 LC-VSI 装置动态无功补偿及自适应直流侧电压之控制。

[0096] 本发明的自适应直流侧电压 LC-VSI 装置有源和无源部分能共同在一定范围提供无功补偿功率, 且因应不同的负载无功功率情况下, LC-VSI 装置自适应调节直流侧电压水平, 从而优化及减少了开关组件的损耗及噪声, 提高 LC-VSI 装置的效率及补偿效果。

[0097] 下面是本发明的一个仿真例：

[0098] 该仿真例中，自适应直流侧电压 LC-VSI 装置被并联在一个线电压为 380V 的三相四线系统中，用来补偿无功功率，该补偿系统的详细示意图如图 5 所示。LC-VSI 装置选用了两电平三桥臂直流电容中分结构之电压型逆变器，在不同负载情况下，LC-VSI 装置逆变器直流侧电压会自适应调节，从以减少开关组件的损耗及噪声，提高 LC-VSI 装置的效率。该仿真例的详细参数如下：

[0099] (1) 系统参数：

[0100] 系统电压  $v_x$  220V、系统频率 50Hz、系统电抗  $L_s$  0.5mH；

[0101] (2) 自适应 LC-VSI 装置系统参数：

[0102] 电容器  $C_c$  及电感器  $L_c$ ：110  $\mu$ F, 10mH；

[0103] 逆变器参考直流侧电压  $V_{dc_U}^*$ ， $V_{dc_L}^*$  分为三个等级： $V_{dc1}/2 = 40V$ ， $V_{dc2}/2 = 80V$  及  $V_{dcmax}/2 = 120V$ ；

[0104] 逆变器直流电容器  $C_{dc}$  为 10mF；

[0105] (3) 三相平衡负载参数：

[0106] 感性负载 1：电阻  $R_{L1}$  和电感  $L_{L1}$ ：13.9  $\Omega$ ，50mH；

[0107] 感性负载 2：电阻  $R_{L2}$  和电感  $L_{L2}$ ：36.0  $\Omega$ ，50mH；

[0108] 感性负载 3：电阻  $R_{L3}$  和电感  $L_{L3}$ ：43.0  $\Omega$ ，50mH；

[0109] 本仿真例中自适应直流侧电压 LC-VSI 装置在不同负载无功功率  $Q_{Lxf}$  上之所需最小直流侧电压等级 ( $V_{dc_U}$ ， $V_{dc_L} = 40V, 80V, 120V$ ) 如下表所示：

[0110]

无源部分(PF)提供之无功功率 $Q_{cx_f\_PF}$	仿真三相平衡负载无功功率 $Q_{Lxf}$ (VAR)		所需 $V_{dc\_min}/2$	最小直流侧电压等级 $V_{dc_U}, V_{dc_L}$
$L_c = 10mH, C_c = 110\mu F$ $Q_{cx_f\_PF} = -1876.3VAR$	感性负载 1	1720.3	25.9V	40V
	感性负载 1 及 2	2208.7	55.1V	80V
	感性负载 1,2 及 3	2569.0	114.9V	120V

[0111] 根据图 4，当求得最终参考电流  $i_{cx}^*$  后，利用 7.5kHz 三角载波 PWM 方法控制逆变器输出补偿电流  $i_{cx}$  跟踪参考电流  $i_{cx}^*$ 。在 6 种不同状况仿真下，图 6 所示为自适应直流侧电压 LC-VSI 装置在不同感性负载下整个仿真动态补偿过程及其波形图 (a) 负载侧无功功率  $Q_{Lxf}$ ，(b) 直流侧电压  $V_{dc_U}$ ， $V_{dc_L}$ ，(c) 电源侧无功功率  $Q_{sxf}$ ，(d) LC-VSI 装置注入无功功率  $Q_{cx_f}$ 。由图 6 可见，直流侧电压  $V_{dc_U}$ ， $V_{dc_L}$  及 LC-VSI 装置注入无功功率  $Q_{cx_f}$  能因应不同情况自适应地进行调节。在不同负载情况下，系统侧电压  $v_x$  和负载侧电流  $i_{Lx}$  波形如图 7(a) - 9(a) 所示，而 LC-VSI 装置补偿后系统侧电压  $v_x$  和系统侧电流  $i_{sx}$  波形如图 7(b) - 9(b) 所示。补偿前后的系统侧无功功率  $Q_{sxf}$ ，基频功率因数 DPF 和电流  $i_{sx}$  有效值如下表所示：

不同负载情况	三相补偿前负载侧			三相补偿后系统侧		
	$Q_{Lxf}$ (VAR)	DPF= $\cos \theta_{Lxf}$	$i_{sx}$ (A <sub>rms</sub> )	$Q_{sxf}$ (VAR)	DPF= $\cos \theta_{sxf}$	$i_{sx}$ (A <sub>rms</sub> )
[0112] 感性负载 1	1720.3	0.665	10.48	-20.0	1.000	7.03
感性负载 1 及 2	2208.7	0.768	15.78	119.3	0.999	12.28
感性负载 1,2 及 3	2569.0	0.817	20.43	188.9	0.999	16.63

[0113] 从以上结果可见,在不同负载情况下,当投入自适应直流侧电压 LC-VSI 装置后,系统侧无功功率  $Q_{sxf}$  得到大大减少,系统侧基频功率因数 DPF 改善到 0.999 或以上,而且系统侧电流  $i_{sx}$  有效值亦显著地减少。从以上仿真结果及图 6 至图 9 可见,自适应直流侧电压 LC-VSI 装置 ( $V_{dcmax}/2 = 120V$ ) 的有源和无源部分能共同在一定范围提供无功补偿功率。此外,对比于传统固定直流侧电压水平 ( $V_{dcU}, V_{dcL} = 120V$ ) LC-VSI 装置补偿结果,如图 10 所示,它们大致都能得到差不多稳态无功补偿结果,但自适应直流侧电压 LC-VSI 装置能自适应调节直流侧电压,优化及减少开关组件的损耗及噪声,提高 LC-VSI 装置的效率及补偿效果。

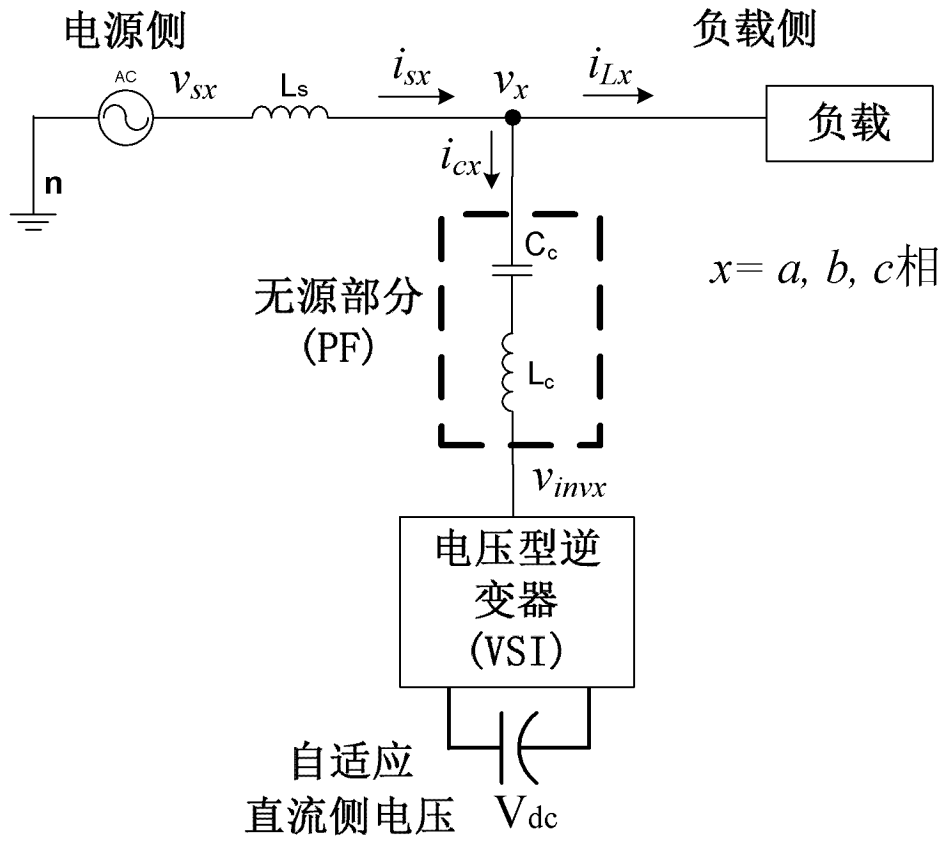


图 1

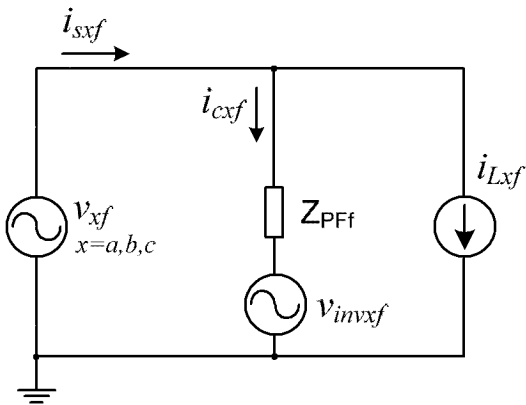


图 2

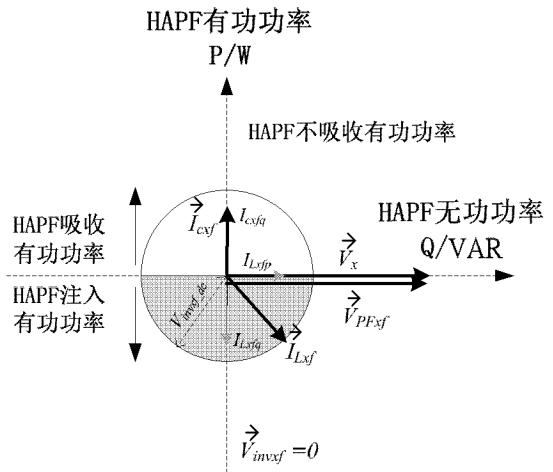


图 3a

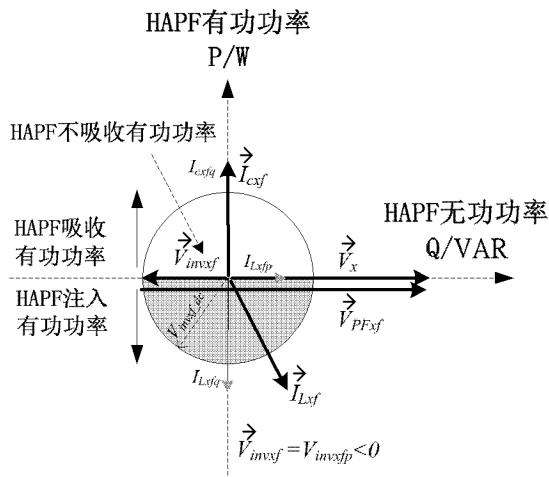


图 3b

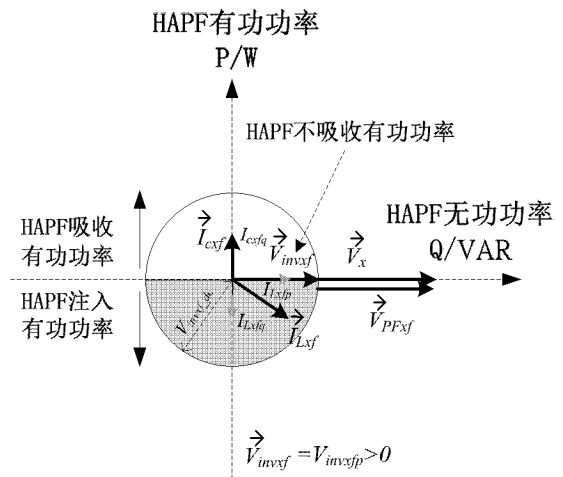


图 3c

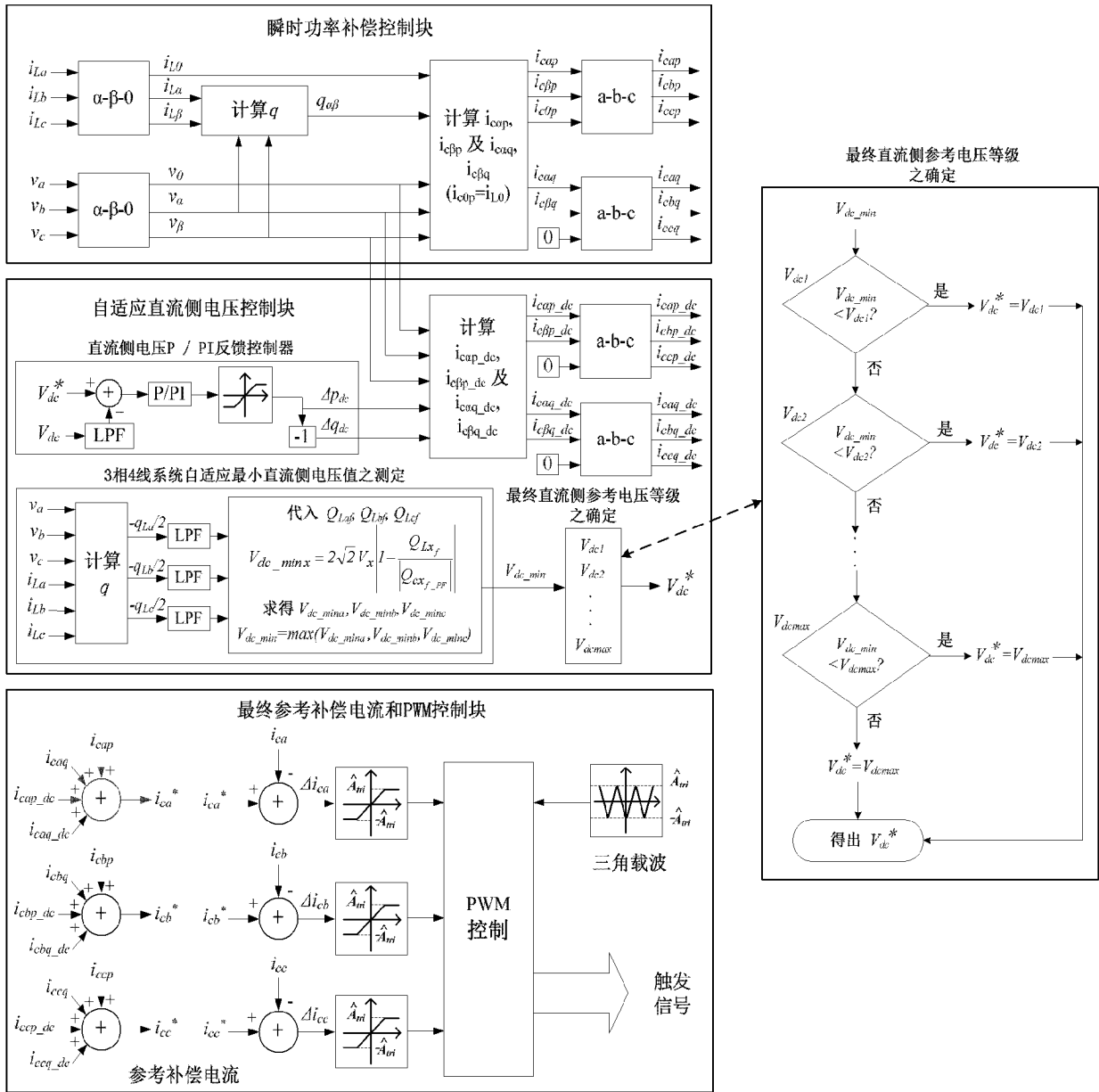


图 4



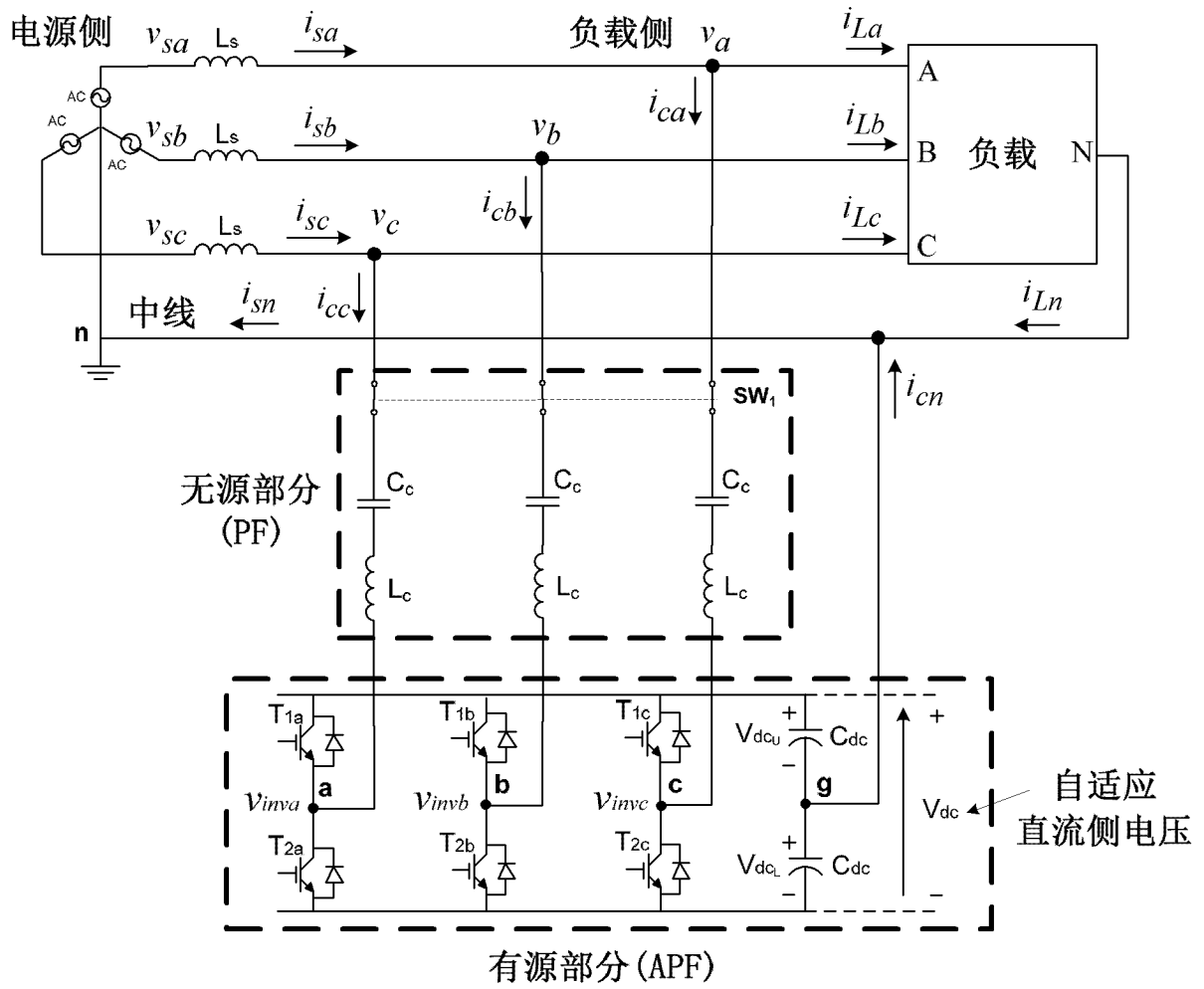


图 5

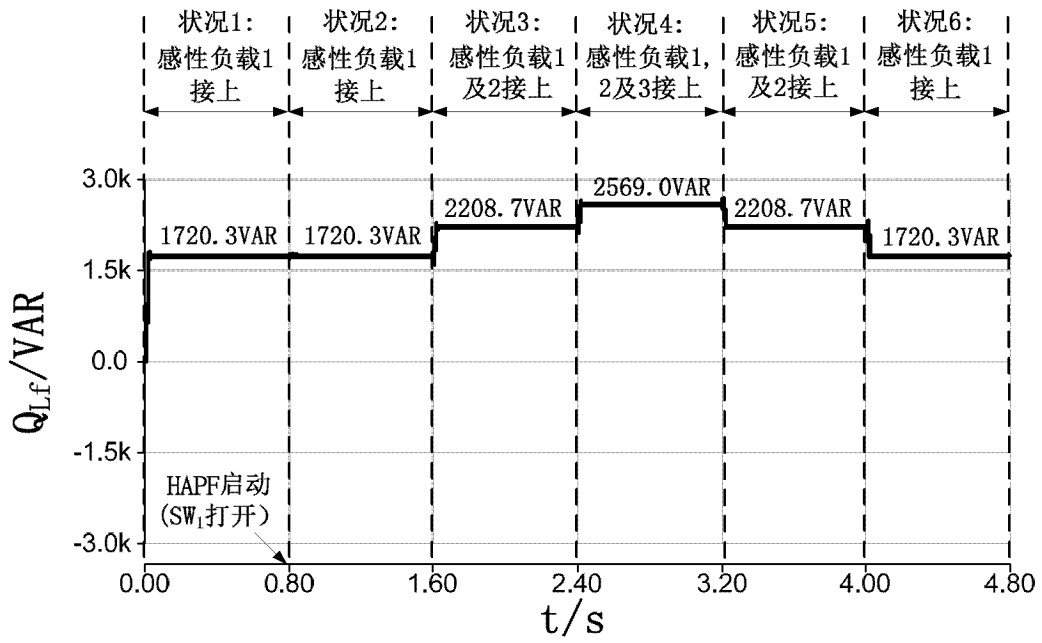


图 6a

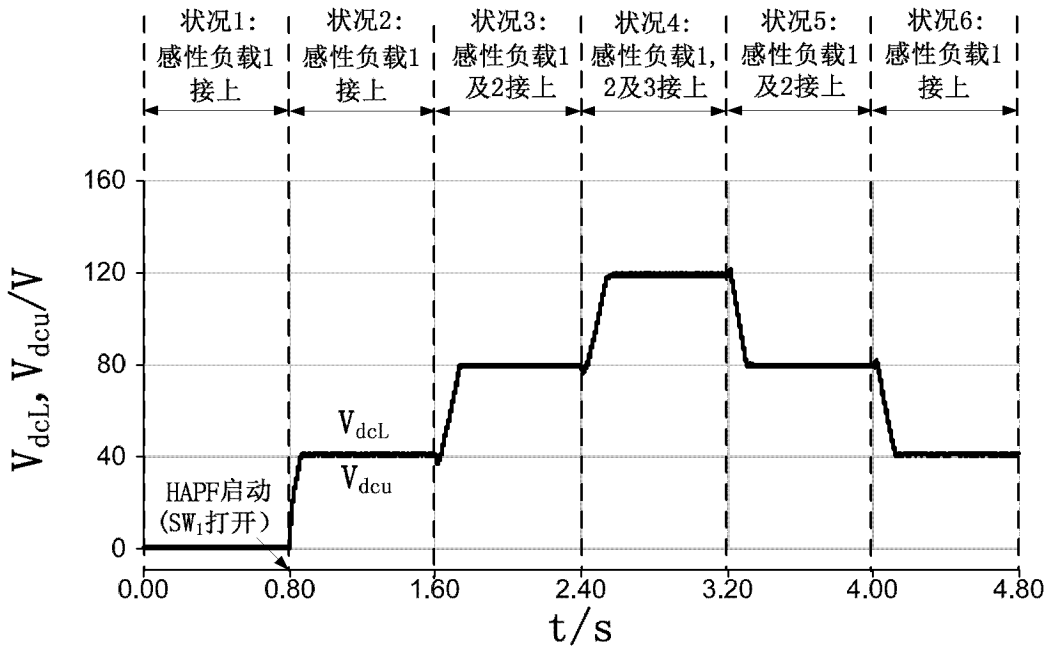


图 6b

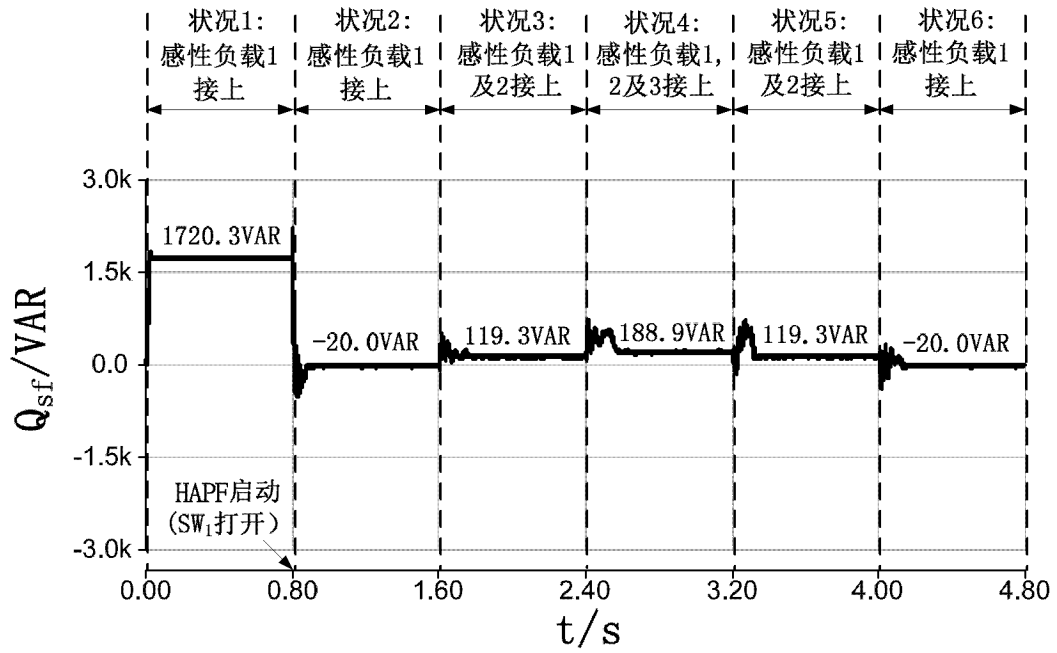


图 6c

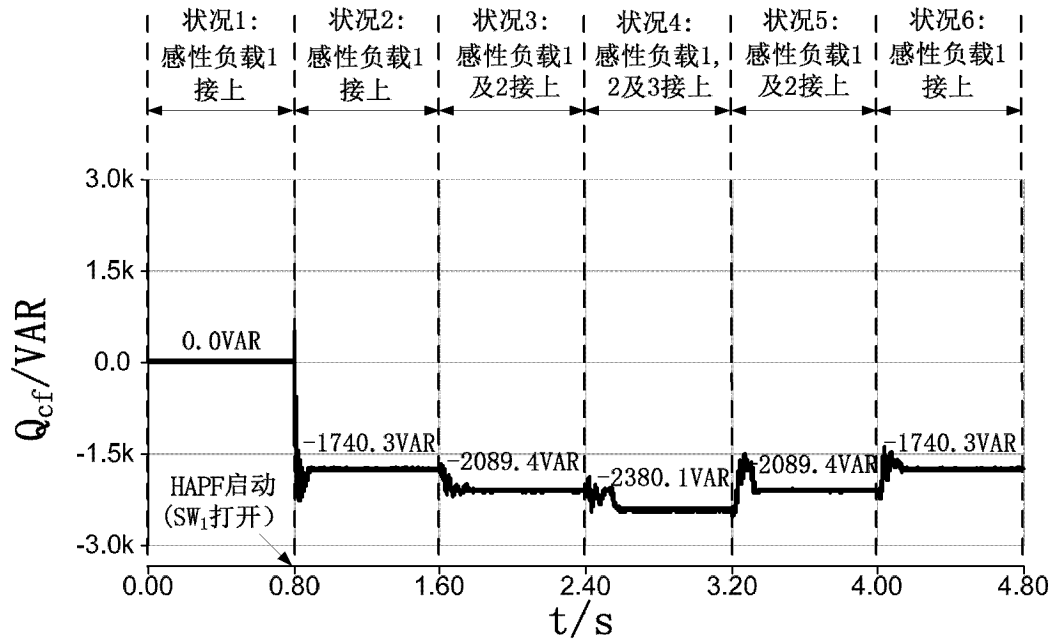


图 6d

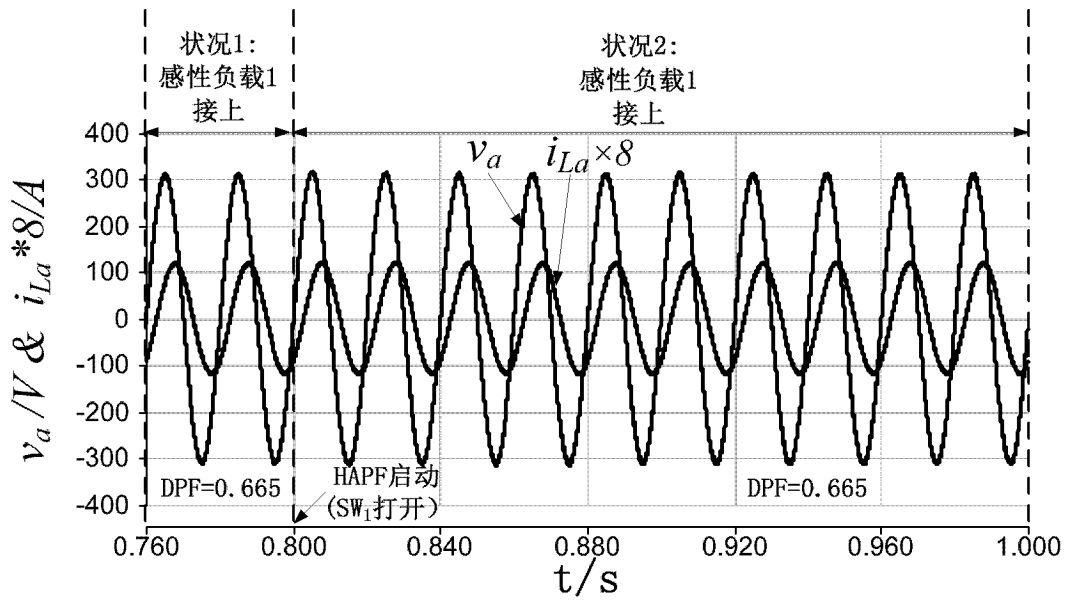


图 7a

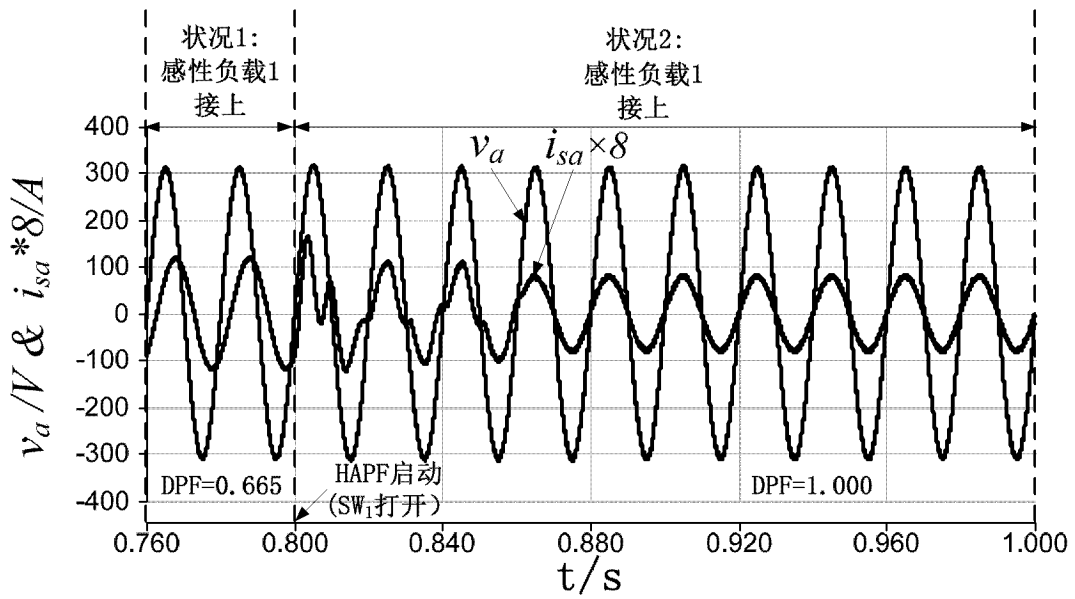


图 7b

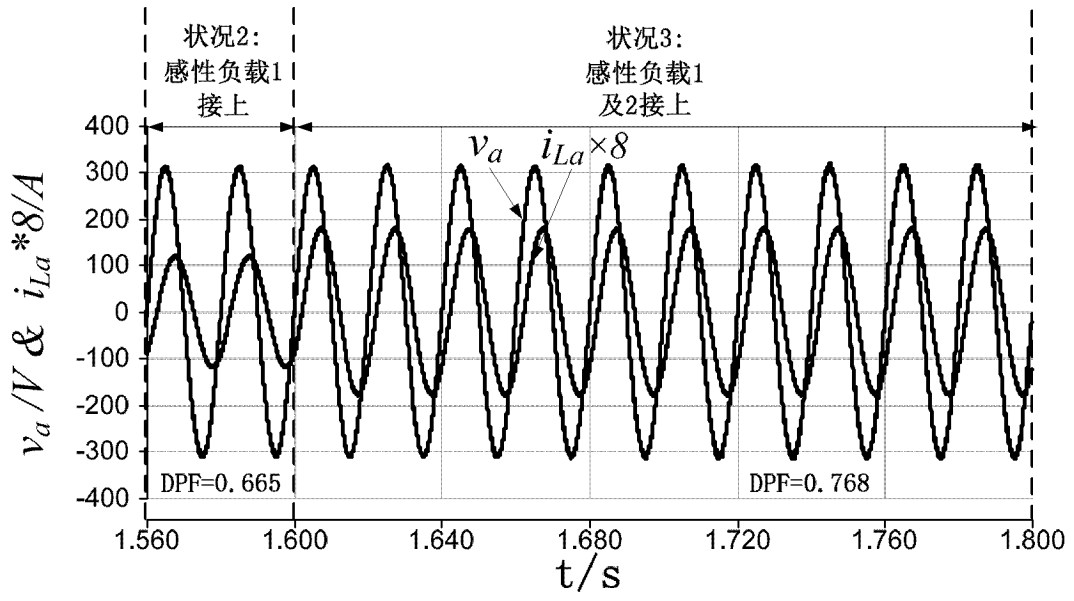


图 8a

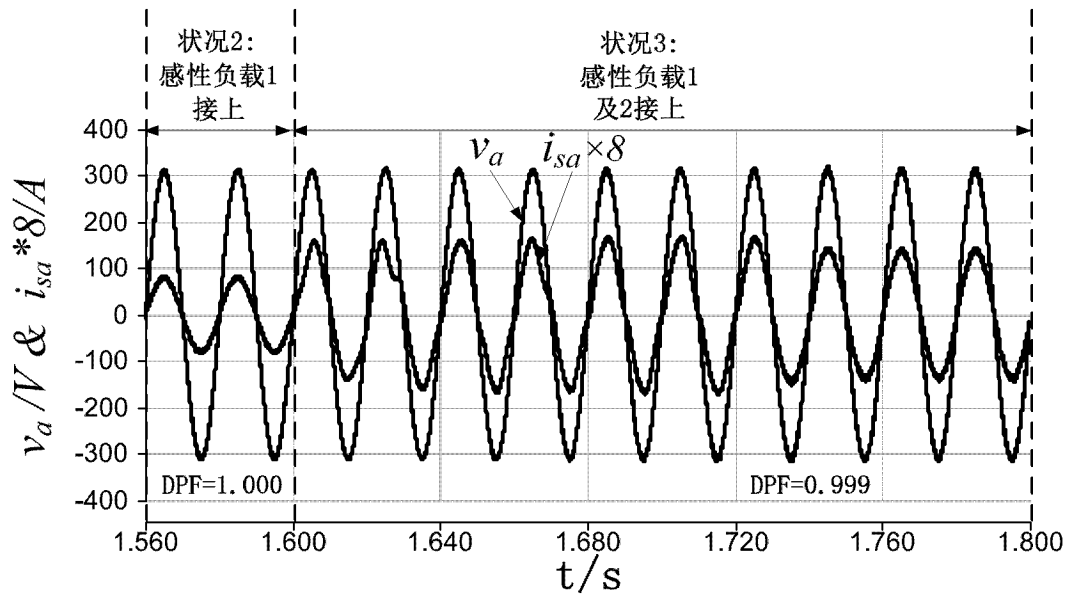


图 8b

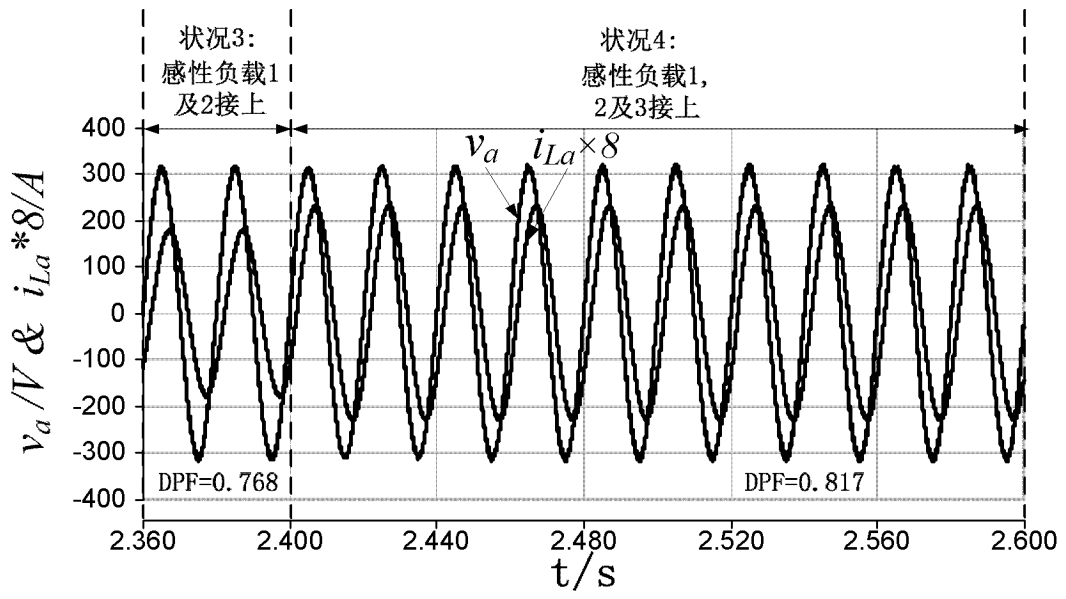


图 9a

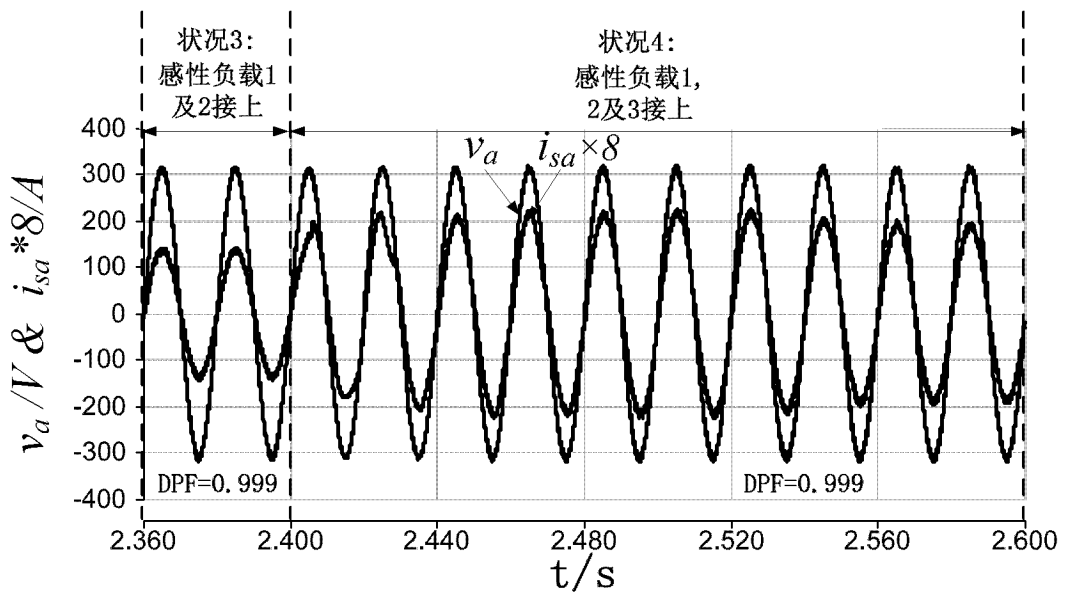


图 9b

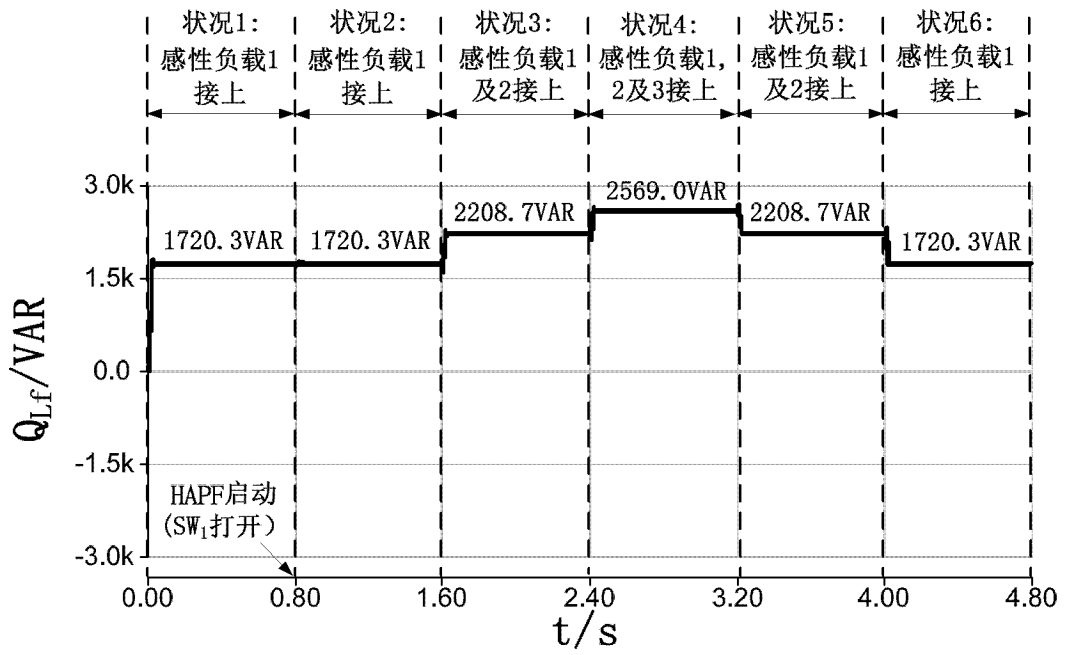


图 10a

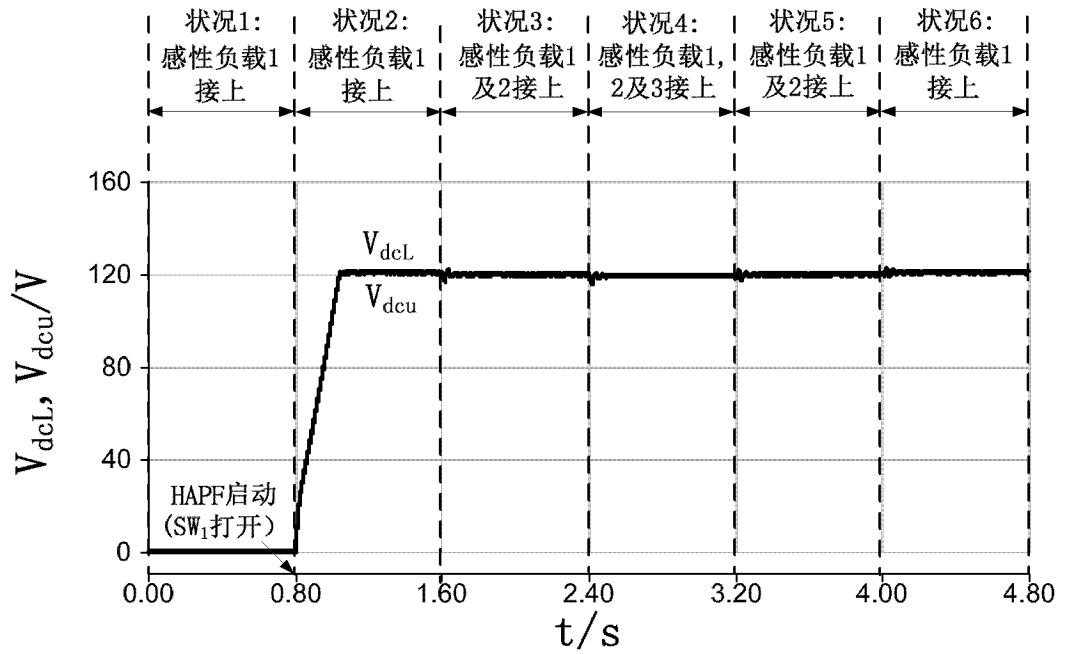


图 10b

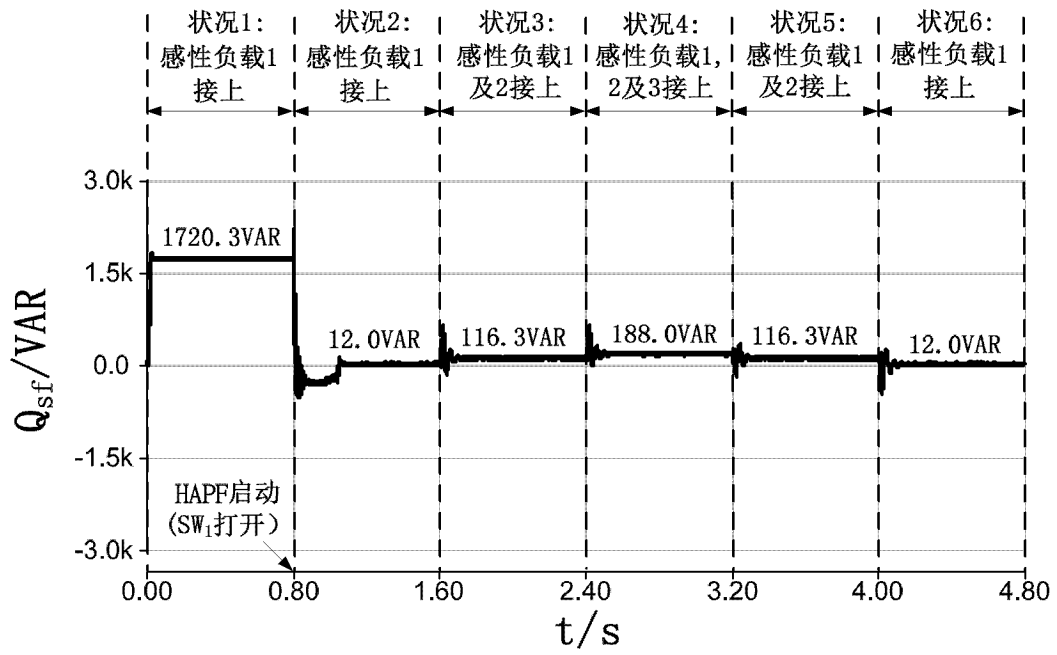


图 10c

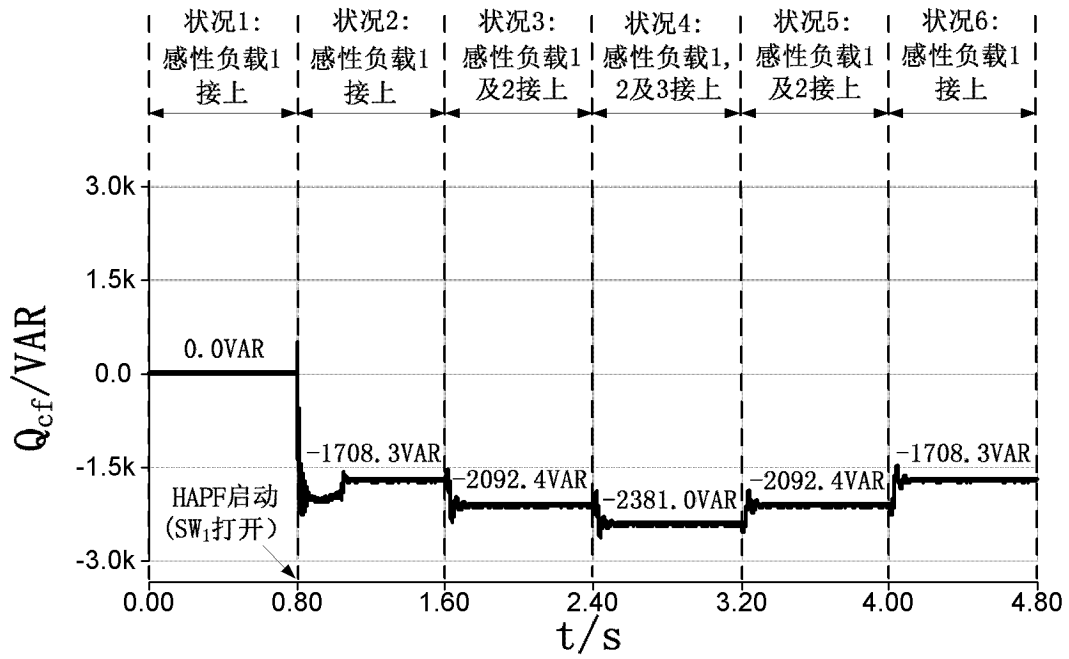


图 10d