# 基于无源滑模和滑模 PI的 UPQC-PV 控制策略

叶剑桥,周建萍,茅大钧,葛祥一,张 健,方 乐 (上海电力大学自动化工程学院,上海 200090)

摘要:针对传统控制方法使集成光伏式统一电能质量调节器(UPQC-PV)存在补偿效率和精确性较低、直流侧 电压易受外界干扰等问题,提出了针对UPQC-PV的无源滑模控制和滑模PI直流侧控制策略。首先,基于统 一电能质量调节器的数学模型,设计了基于欧拉--拉格朗日模型的正负序无源滑模控制器,解决无源控制抗 干扰能力弱的问题,提高了系统的响应速度、补偿精度、抗干扰能力;然后,采用滑模PI控制降低光伏波动对 系统的影响,稳定系统直流侧电压,从而进一步改善系统的整体性能;最后,在电网不平衡、负载突变、负载不 平衡、光照强度改变等状态下,通过仿真和实验验证了所提无源滑模控制和滑模PI直流侧控制策略的优越 性、有效性。

关键词:UPQC-PV;无源滑模控制;滑模PI控制;正负序分离;电能质量中图分类号:TM 615;TM 571.2 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012024

# 0 引言

随着电力行业的不断发展,电能质量问题越来 越受到重视。与传统的电气负载相比,由电力电子设 备组成的新一代配电系统对电能质量的要求也越来 越高,电能质量成为不能忽视的问题<sup>[1-2]</sup>。因此各种 电能质量调节器应运而生,如有源电力滤波器(APF)、 静态无功补偿器(SVC)、动态电压恢复器(DVR)等。 但这些调节器只能解决部分电能质量问题,而统一 电能质量调节器(UPQC)能够解决大部分的电能质 量问题,因而受到学者的广泛讨论和研究<sup>[3]</sup>。

目前,常规UPQC存在直流侧储能不足的问题, 限制了UPQC的使用和发展。有学者提出在直流侧 加入分布式发电单元,用于解决UPQC补偿效率低 等问题<sup>[4-5]</sup>。文献[6]提出一种应用于铁路牵引的电 能质量调节器,其扩大了UPQC的使用范围,且节省 了设备容量;文献[7]将储能元件和UPQC相结合, 探讨了全补偿时的容量配置策略;文献[8]提出了基 于超级电容的微电网UPQC拓扑结构,用于改善微 电网的电能质量。近年来,由光伏(PV)发电和UPQC 相结合的新拓扑——集成光伏式统一电能质量调 节器(UPQC-PV)应运而生,其不但提高了UPQC的 补偿效率,而且与传统的并网光伏系统相比,供电质 量更高且更加清洁<sup>[8]</sup>。文献[9-10]对UPQC-PV的性 能进行了评估,并将其应用于商业建筑中,证明其能 保护用户的敏感设备,提高电能质量。综上可以看

#### 收稿日期:2020-06-23;修回日期:2020-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61275038);上海市 "科技创新行动计划"地方院校能力建设专项(19020500700) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61275038) and the Local Colleges and Universities Capacity Construction Project of Shanghai "Science and Technology Innovation Action Plan"(19020500700) 出,UPQC-PV有着很广阔的应用前景。

关于 UPOC-PV 的控制, 文献 [11-12] 采用改进 功率角的控制方法,重点研究了电网不平衡分量的 提取,但没有考虑对直流侧进行相应的控制,受光伏 发电波动的影响较大;文献[13]提出了一种针对单 相两级 UPQC-PV 的控制方法,该方法依赖于二阶广 义积分器以及对延迟信号的消除,不利于控制系统 的简化;文献[14]重点分析了UPQC-PV的数学模型 和设计,对系统参数进行了精确的计算,但仍没有解 决直流侧容易波动的问题;文献[15]对最大功率点 跟踪(MPPT)算法进行了改进,使其适应UPQC-PV 的系统结构,但没有改进UPQC自身的控制,补偿效 果不太理想;文献[16-18]提出结合PI控制器和改进 MPPT算法来稳定直流侧电压,但未考虑系统自身的 特性,且控制参数不易确定;文献[19]采用滑模控制 策略稳定直流侧电压,但UPOC系统本身采用滞环 控制,在电网不稳定时系统精确性会下降。

综上可知,关于 UPQC-PV 系统控制中的研究大 多更加关注 UPQC 串联、并联侧的建模和控制,因此, 如何解决直流侧电压稳定、提高系统自身的补偿效 率和精度,是当前 UPQC-PV 亟待解决的问题。为此, 本文首先针对 UPQC-PV 提出了基于欧拉-拉格朗日 EL(Euler-Lagrange)模型的正负序无源滑模控制,以 提高整体系统的快速响应能力、补偿质量;然后,针对 直流侧电压易受光照影响的问题,提出采用滑模 PI 控制器,以消除光伏对直流侧电压的干扰;最后,通 过仿真、实验进一步验证所提控制策略的有效性和优 越性。

# 1 UPQC-PV 的数学模型

# 1.1 UPQC-PV的拓扑结构

UPQC-PV的主电路结构见附录A中图A1,整个

系统由串联补偿器、并联补偿器、直流侧电容、光伏 阵列4个部分组成。图中, $U_j(j \in \{a, b, c\}), U_{ij}, U_{ij}$ 分 别为*j*相交流电源电压、串联补偿器(采用二极管箝 位式的全桥逆变器结构)提供的补偿电压、负载侧电 压; $i_{g1}, i_{g2}$ 分别为*j*相串联补偿器提供的电流、并联侧 输出的补偿电流; $i_{j1}, i_{j2}$ 分别为*j*相串联补偿器的输出 电流、并联侧输出电流; $U_{j1}, U_{j2}$ 分别为*j*相串联侧、并 联侧的输出电压; $L_1, L_2$ 分别为串联侧、并联侧电感;  $R_1, R_2$ 分别为串联侧、并联侧电阻; $C_a$ ,为直流侧电容。

根据基尔霍夫定律,可以得到 UPQC-PV 串联侧、并联侧补偿器在 abc 三相静止坐标系下的数学 模型,分别如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} L_{1} di_{a1}/dt + R_{1}i_{a1} - U_{a1} = -U_{ca} \\ L_{1} di_{b1}/dt + R_{1}i_{b1} - U_{b1} = -U_{cb} \\ L_{1} di_{c1}/dt + R_{1}i_{c1} - U_{c1} = -U_{cc} \end{cases}$$
(1)  
$$\begin{cases} L_{2} di_{a2}/dt + R_{2}i_{a2} - U_{a2} = -U_{La} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_2 di_{b2}/dt + R_2 i_{b2} - U_{b2} = -U_{Lb} \\ L_2 di_{c2}/dt + R_2 i_{c2} - U_{c2} = -U_{Lc} \end{cases}$$
(2)

考虑到电网会存在不平衡的情况,对系统进行 正负序分离,将式(1)和式(2)变换到 dq 两相旋转坐 标系下,可得:

$$\begin{cases} L_{1} di_{d1}^{+}/dt + R_{1}i_{d1}^{+} - \omega L_{1}i_{q1}^{+} - U_{d1}^{+} = -U_{cd}^{+} \\ L_{1} di_{q1}^{+}/dt + R_{1}i_{q1}^{+} + \omega L_{1}i_{q1}^{+} - U_{q1}^{+} = -U_{cq}^{+} \\ L_{1} di_{q1}^{-}/dt + R_{1}i_{q1}^{-} + \omega L_{1}i_{q1}^{-} - U_{d1}^{-} = -U_{cd}^{-} \\ L_{1} di_{q1}^{-}/dt + R_{1}i_{q1}^{-} - \omega L_{1}i_{d1}^{-} - U_{q1}^{-} = -U_{cq}^{-} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_{2} di_{d2}^{+}/dt + R_{2}i_{d2}^{+} - \omega L_{2}i_{q2}^{+} - U_{d2}^{+} = -U_{Ld}^{+} \\ L_{2} di_{q2}^{+}/dt + R_{2}i_{q2}^{+} + \omega L_{2}i_{d2}^{+} - U_{q2}^{+} = -U_{Lq}^{+} \\ L_{2} di_{d2}^{-}/dt + R_{2}i_{d2}^{-} + \omega L_{2}i_{q2}^{-} - U_{d2}^{-} = -U_{Ld}^{-} \\ L_{2} di_{q2}^{-}/dt + R_{2}i_{q2}^{-} - \omega L_{2}i_{q2}^{-} - U_{d2}^{-} = -U_{Ld}^{-} \end{cases}$$

$$(4)$$

其中, $\omega$ 为系统角频率; $i_{a}^{i}$ 、 $i_{a}^{i}$ 和 $i_{qi}^{i}$ 、 $i_{qi}^{i}$ (下标i取1、2时 分别表示串联侧、并联侧)分别为i侧输出电流d轴 分量和q轴分量的正序、负序分量; $U_{a}^{i}$ 、 $U_{ai}^{i}$ 和 $U_{qi}^{i}$ 、 $U_{qi}^{i}$ 分别为i侧输出电压d轴分量和q轴分量的正序、负 序分量; $U_{cd}^{-}$ 、 $U_{cq}^{-}$ 分别为串联侧补偿电压d轴分量和q轴分量的正序、负序分量; $U_{Ld}^{-}$ 、 $U_{Lq}^{-}$ 和 $U_{Lq}^{+}$ 、  $U_{Lq}^{-}$ 分别为负载侧电压d轴分量和q轴分量的正序、 负序分量。

#### 1.2 UPQC-PV的EL数学模型

将式(3)和式(4)写成矩阵形式,可得到串联侧、 并联侧 EL模型为:

$$\begin{cases} M_{i}\dot{x}_{i}^{+} + J_{i}^{+}x_{i}^{+} + R_{i}x_{i}^{+} = u_{i}^{+} \\ M_{i}\dot{x}_{i}^{-} + J_{i}^{-}x_{i}^{-} + R_{i}x_{i}^{-} = u_{i}^{-} \end{cases}$$
(5)

其中,M为广义惯性矩阵,代表系统相关的储能元件;J<sup>+</sup>、J<sup>-</sup>为系统相互耦合关系矩阵;R为系统的正 定耗散矩阵;u<sup>+</sup>、u<sup>-</sup>为系统输入向量;x<sup>+</sup>、x<sup>-</sup>为系统状态向量。各矩阵的表达式见附录B。

# 2 UPQC-PV的控制策略

串联侧的控制策略推导过程与并联侧相似,本 节主要阐述并联侧的控制策略推导过程。

#### 2.1 UPQC-PV的无源滑模控制策略

当电网存在谐波时,假设并联侧补偿电流的正 序期望值、负序期望值分别为:

$$\boldsymbol{x}_{2\text{ref}}^{+} = [i_{d2\text{ ref}}^{+}, i_{q2\text{ ref}}^{+}]^{\mathrm{T}}$$
(6)

$$\boldsymbol{x}_{\text{2ref}}^{-} = [\, \boldsymbol{i}_{d2\,\text{ref}}^{-}, \, \boldsymbol{i}_{q2\,\text{ref}}^{-}]^{\text{T}} \tag{7}$$

其中, $i_{d2ref}$ 、 $i_{q2ref}$ 分别为状态变量 $i_{d2}$ 、 $i_{q2}$ 的期望值,即并 联侧补偿电流的正序期望值; $i_{d2ref}$ 、 $i_{q2ref}$ 分别为状态 变量 $i_{d2}$ 、 $i_{a2}$ 的期望值。

将式(6)和式(7)代入式(5)中,可以得到并联侧 系统的伴随系统模型为:

$$\begin{cases} M_{2}\dot{x}_{2ref}^{+} + J_{2}^{+}x_{2ref}^{+} + R_{2}x_{2ref}^{+} = u_{2}^{+} \\ M_{2}\dot{x}_{2ref}^{-} + J_{2}^{-}x_{2ref}^{-} + R_{2}x_{2ref}^{-} = u_{2}^{-} \end{cases}$$
(8)

令并联侧补偿器状态变量正序系统的误差**x**<sup>+</sup><sub>2e</sub>、 负序系统的误差**x**<sup>-</sup><sub>2e</sub>为:

$$\mathbf{x}_{2e}^{+} = \mathbf{x}_{2}^{+} - \mathbf{x}_{2ref}^{+}, \ \mathbf{x}_{2e}^{-} = \mathbf{x}_{2}^{-} - \mathbf{x}_{2ref}^{-}$$
 (9)

将式(5)与式(8)相减,可得到系统跟踪状态变量的偏差动态方程为:

$$\begin{cases} M_{2}\dot{\mathbf{x}}_{2e}^{+} + J_{2}^{+}\mathbf{x}_{2e}^{+} + R_{2}\mathbf{x}_{2e}^{+} = \\ u_{2}^{+} - (M_{2}\dot{\mathbf{x}}_{2ref}^{+} + J_{2}^{+}\mathbf{x}_{2ref}^{+} + R_{2}\mathbf{x}_{2ref}^{+}) \\ M_{2}\dot{\mathbf{x}}_{2e}^{-} + J_{2}^{-}\mathbf{x}_{2e}^{-} + R_{2}\mathbf{x}_{2e}^{-} = \\ u_{2}^{-} - (M_{2}\dot{\mathbf{x}}_{2ref}^{-} + J_{2}^{-}\mathbf{x}_{2ref}^{-} + R_{2}\mathbf{x}_{2ref}^{-}) \end{cases}$$
(10)

选取式(10)的误差能量存储函数为:

$$\begin{cases} H_2^+ = (\mathbf{x}_{2e}^+)^{\mathrm{T}} M_2 \mathbf{x}_{2e}^+ / 2 \\ H_2^- = (\mathbf{x}_{2e}^-)^{\mathrm{T}} M_2 \mathbf{x}_{2e}^- / 2 \end{cases}$$
(11)

对式(11)进行求导,且满足:

$$\begin{cases} \dot{H}_{2}^{+} = (\mathbf{x}_{2e}^{+})^{\mathrm{T}} \mathbf{M}_{2} \dot{\mathbf{x}}_{2e}^{+} = (\mathbf{x}_{2e}^{+})^{\mathrm{T}} \mathbf{u}_{2}^{+} - (\mathbf{x}_{2e}^{+})^{\mathrm{T}} \mathbf{R}_{2} \mathbf{x}_{2e}^{+} \leq \\ (\mathbf{x}_{2e}^{+})^{\mathrm{T}} \mathbf{u}_{2}^{+} - \mathbf{Q}^{+} (\mathbf{x}) \\ \dot{H}_{2}^{-} = (\mathbf{x}_{2e}^{-})^{\mathrm{T}} \mathbf{M}_{2} \dot{\mathbf{x}}_{2e}^{-} = (\mathbf{x}_{2e}^{-})^{\mathrm{T}} \mathbf{u}_{2}^{-} - (\mathbf{x}_{2e}^{-})^{\mathrm{T}} \mathbf{R}_{2} \mathbf{x}_{2e}^{-} \leq \\ (\mathbf{x}_{2e}^{-})^{\mathrm{T}} \mathbf{u}_{2}^{-} - \mathbf{Q}^{-} (\mathbf{x}) \end{cases}$$
(12)

其中, $Q^+(x)$ 、 $Q^-(x)$ 为正定函数, $Q^+(x) = (x_{2e}^+)^T R_2 x_{2e}^+$ ,  $Q^-(x) = (x_{2e}^-)^T R_2 x_{2e}^-$ 。则可知该系统是严格无源的, 当且仅当 $x_{2e}^+$ 和 $x_{2e}^-$ 等于0时,有 $H_2^+ = H_2^- = 0$ 。根据 La Salle不变集原理,当 $t \to \infty$ 时, $x_{2e}^+$ 、 $x_{2e}^-$ 指数衰减至 0,存在:

$$\begin{cases} \lim_{t \to \infty} \mathbf{x}_{2}^{+}(t) = \lim_{t \to \infty} \mathbf{x}_{2 \operatorname{ref}}^{+}(t) \\ \lim_{t \to \infty} \mathbf{x}_{2}^{-}(t) = \lim_{t \to \infty} \mathbf{x}_{2 \operatorname{ref}}^{-}(t) \end{cases}$$
(13)

其中, $\mathbf{x}_{2}^{*}(t)$ 、 $\mathbf{x}_{2}^{-}(t)$ 分别为并联侧补偿器状态变量正、 负序系统的实际值; $\mathbf{x}_{2ref}^{*}(t)$ 、 $\mathbf{x}_{2ref}^{-}(t)$ 分别为并联侧补 偿器状态变量正、负序系统的参考值。由式(10)可 知,注入合适的阻尼系数能使系统快速逼近期望值, 提高系统的收敛速度,因此可以令阻尼系数注入为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_{2d}^{+} \boldsymbol{x}_{2e}^{+} = (\boldsymbol{R}_{2} + \boldsymbol{R}_{a}^{+}) \boldsymbol{x}_{2e}^{+} \\ \boldsymbol{R}_{2d}^{-} \boldsymbol{x}_{2e}^{-} = (\boldsymbol{R}_{2} + \boldsymbol{R}_{a}^{-}) \boldsymbol{x}_{2e}^{-} \end{cases}$$
(14)

其中, $R_{2d}^*$ , $R_{2d}^-$ 为系统的整体阻尼; $R_a^*$ , $R_a^-$ 分别为正 序、负序注入阻尼。将式(14)代入式(10)中可得:

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}_{2} \dot{\boldsymbol{x}}_{2e}^{+} + \boldsymbol{J}_{2}^{+} \boldsymbol{x}_{2e}^{+} + \boldsymbol{R}_{2d} \boldsymbol{x}_{2e}^{+} = \boldsymbol{u}_{2}^{+} - \\ (\boldsymbol{M}_{2} \dot{\boldsymbol{x}}_{2ref}^{+} + \boldsymbol{J}_{2}^{+} \boldsymbol{x}_{2ref}^{+} + \boldsymbol{R}_{2} \boldsymbol{x}_{2ref}^{+} - \boldsymbol{R}_{a}^{+} \boldsymbol{x}_{2e}^{+}) \\ \boldsymbol{M}_{2} \dot{\boldsymbol{x}}_{2e}^{-} + \boldsymbol{J}_{2}^{-} \boldsymbol{x}_{2e}^{-} + \boldsymbol{R}_{2d} \boldsymbol{x}_{2e}^{-} = \boldsymbol{u}_{2}^{-} - \\ (\boldsymbol{M}_{2} \dot{\boldsymbol{x}}_{2ref}^{-} + \boldsymbol{J}_{2}^{-} \boldsymbol{x}_{2ref}^{-} + \boldsymbol{R}_{2} \boldsymbol{x}_{2ref}^{-} - \boldsymbol{R}_{a}^{-} \boldsymbol{x}_{2e}^{-}) \end{cases}$$
(15)

根据式(12)的分析,令式(15)等号的左边部分 等于0,即可保证式(13)成立。重写式(15),可得系 统并联侧的正、负序无源控制器控制律,分别如式 (16)和式(17)所示。

$$\begin{pmatrix} U_{Ld}^{+} = U_{d2}^{+} + \omega L_{2}i_{q2}^{+} - R_{2}i_{d2\,ref}^{+} + R_{a1}^{+}(i_{d2}^{+} - i_{d2\,ref}^{+}) \\ U_{Lq}^{+} = U_{q2}^{+} - \omega L_{2}i_{d2}^{+} - R_{2}i_{q2\,ref}^{+} + R_{a2}^{+}(i_{q2}^{+} - i_{q2\,ref}^{+}) \end{cases}$$
(16)

$$\begin{cases} U_{1d}^{-} = U_{d2}^{-} - \omega L_{2}i_{q2}^{-} - R_{2}i_{d2\,ref}^{-} + R_{a3}^{-}(i_{d2}^{-} - i_{d2\,ref}^{-}) \\ U_{1q}^{-} = U_{q2}^{-} + \omega L_{2}i_{d2}^{-} - R_{2}i_{q2\,ref}^{-} + R_{a4}^{-}(i_{q2}^{-} - i_{q2\,ref}^{-}) \end{cases}$$
(17)

其中, R<sup>+</sup><sub>a1</sub>、R<sup>+</sup><sub>a2</sub>分别为正序 d、q 轴上注入阻尼; R<sup>-</sup><sub>a3</sub>、R<sup>-</sup><sub>a4</sub> 分别为负序 d、q 轴上注入阻尼。由式(16)和式(17) 可以看出, 无源控制是基于精确数学模型推导得到 的, 而在实际运行中平衡点会发生变化, 从而对控制 律造成相应的扰动。利用滑模控制能够抵抗内外扰 动的特点, 可以进一步优化无源控制。

选取并联侧正序滑模面 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和负序滑模面  $\sigma_3$ 、 $\sigma_4$ 为:

$$\begin{cases} \sigma_{1} = i_{d2}^{+} - i_{d2\,\mathrm{ref}}^{+}, \ \sigma_{2} = i_{q2}^{+} - i_{q2\,\mathrm{ref}}^{+} \\ \sigma_{3} = i_{d2}^{-} - i_{d2\,\mathrm{ref}}^{-}, \ \sigma_{4} = i_{q2}^{-} - i_{q2\,\mathrm{ref}}^{-} \end{cases}$$
(18)

为了解决抖振问题,本文选取趋近律为:

$$\dot{\sigma} = -\varepsilon \gamma(\sigma) - k\sigma \qquad (19)$$

$$\gamma(\sigma) = \begin{cases} 1 & \sigma > \Delta \\ 0 & |\sigma| \leq \Delta \\ -1 & \sigma < -\Delta \end{cases}$$

其中, $\varepsilon$ 、k为趋近律系数,均为正数; $\gamma(\sigma)$ 为饱和函数; $\Delta$ 为饱和函数的滞回区间,是一正数。 $\Delta$ 主要用于使开关控制保持在 $\sigma=0$ 上,从而解决开关高频振动所带来的抖振问题。

联立式(4)和式(19),可得:

$$\begin{cases} U_{1d}^{+} = U_{d2}^{+} + \omega L_{2}i_{q2}^{+} - R_{2}i_{d2}^{+} + \\ \varepsilon_{1}L_{2}\gamma(\sigma_{1}) + k_{1}L_{2}\sigma_{1} \\ U_{1q}^{+} = U_{q2}^{+} - \omega L_{2}i_{d2}^{+} - R_{2}i_{q2}^{+} + \\ \varepsilon_{2}L_{2}\gamma(\sigma_{2}) + k_{2}L_{2}\sigma_{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{1d}^{-} = U_{d2}^{-} - \omega L_{2}i_{q2}^{-} - R_{2}i_{d2}^{-} + \\ \varepsilon_{3}L_{2}\gamma(\sigma_{3}) + k_{3}L_{2}\sigma_{3} \\ U_{1q}^{-} = U_{q2}^{-} + \omega L_{2}i_{d2}^{-} - R_{2}i_{q2}^{-} + \\ \varepsilon_{4}L_{2}\gamma(\sigma_{4}) + k_{4}L_{2}\sigma_{4} \end{cases}$$

$$(20)$$

联立式(16)、(17)、(20)、(21),可以得到并联侧

无源滑模控制器的正、负序控制律,分别如式(22)和式(23)所示。

$$\begin{cases} U_{1d}^{+} = U_{d2}^{+} - R_{2}i_{d2}^{+} + \frac{\omega R_{a1}^{+}L_{2}}{R_{2} + R_{a1}^{+} - k_{1}L_{2}}i_{d2}^{+} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{1}L_{2})i_{d2ref}^{+} + \varepsilon_{1}R_{a1}^{+}L_{2}\gamma(i_{d2}^{+} - i_{d2ref}^{+})}{R_{2} + R_{a1}^{+} - k_{1}L_{2}} (22) \\ U_{1q}^{+} = U_{q2}^{+} - R_{2}i_{q2}^{+} + \frac{\omega R_{a2}^{+}L_{2}}{R_{2} + R_{a2}^{+} - k_{2}L_{2}}i_{d2}^{+} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{2}L_{2})i_{d2ref}^{+} + \varepsilon_{1}R_{a2}^{+}L_{2}\gamma(i_{q2}^{+} - i_{q2ref}^{+})}{R_{2} + R_{a2}^{+} - k_{2}L_{2}} \\ \begin{cases} U_{1d}^{-} = U_{d2}^{-} - R_{2}i_{d2}^{-} + \frac{\omega R_{a3}L_{2}}{R_{2} + R_{a3}^{-} - k_{3}L_{2}}i_{q2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{3}L_{2})i_{q2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a3}L_{2}\gamma(i_{d2}^{-} - i_{d2ref}^{-})}{R_{2} + R_{a3}^{-} - k_{3}L_{2}} \\ U_{1q}^{-} = U_{q2}^{-} - R_{2}i_{q2}^{-} + \frac{\omega R_{a4}L_{2}}{R_{2} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-}L_{2}\gamma(i_{q2}^{-} - i_{q2ref}^{-})}{R_{2} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-}L_{2}\gamma(i_{q2}^{-} - i_{q2ref}^{-})}{R_{2} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-}L_{2}\gamma(i_{q2}^{-} - i_{q2ref}^{-})}{R_{2} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-}L_{2}\gamma(i_{q2}^{-} - i_{q2ref}^{-})}{R_{2} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-}L_{2}\gamma(i_{q2}^{-} - i_{q2ref}^{-})}{R_{2} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-}L_{2}\gamma(i_{q2}^{-} - i_{q2ref}^{-})}{R_{2} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-}L_{2}\gamma(i_{q2}^{-} - i_{q2ref}^{-})}{R_{2}^{-} + R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - k_{4}L_{2})i_{d2ref}^{-} + \varepsilon_{1}R_{a4}^{-} - k_{4}L_{2}}i_{d2}^{-} + \frac{\omega L_{2}(R_{2} - R_{2}^{-})i_{d2}^{-} + \varepsilon_{1}^{-} +$$

同理,可以推导得到串联侧的无源滑模控制律, 限于篇幅不再赘述。

#### 2.2 UPQC-PV直流侧的滑模PI控制策略

UPQC-PV的直流侧并联了光伏阵列,易受太阳 辐射的影响,难以满足系统的动态需求。为此,本文 提出了基于滑模 PI的直流侧控制策略,以消除太阳 辐射对系统直流侧的影响。

由拓扑结构可知, UPQC-PV 直流侧电压参考值 为光伏采用的 MPPT 算法给定的直流侧电压参考值  $U_{denefo}$  可定义直流侧电压 $U_{denefo}$ 的滑模控制面 $\sigma_{de}$ 为:

 $\sigma_{dc} = c(U_{dcref} - U_{dc}) + d(U_{dcref} - U_{dc})/dt \qquad (24)$ 其中, c为滑模面的正常数。

UPQC-PV的直流侧电压稳定是保证系统稳定运行的关键,根据文献[20]可以推导得到UPQC-PV 直流侧的传递函数*G*(*s*)为:

$$G(s) = \frac{2U_{sd}}{U_{dc}C_{dc}} \frac{1 + (L_1 i_{d1}/U_{sd} + L_2 i_{d2}/U_{sd})s}{s + 4/(R_{dc}C_{dc})}$$
(25)

其中, U<sub>sd</sub>为电网侧电压的 d 轴分量; R<sub>de</sub>为直流侧 电阻。

滑模控制器的输出用于确定 PI 控制器的参数 值,设 PI 控制器的传递函数 *G*<sub>oi</sub>(*s*)为:

$$G_{\rm pi}(s) = (k_{\rm p}s + k_{\rm i})/s$$
 (26)

其中, $k_{p}$ 、 $k_{i}$ 为PI控制器的控制参数,由滑模控制进行确定。

根据式(25)和式(26)可以计算得到系统的闭环 传递函数  $G_{d}(s)$  为:

$$G_{d}(s) = \frac{b(k_{p}s + k_{i})}{(s + a) \{s^{2} + [a + b(k_{i} + k_{p})]s + ab(k_{p} + k_{i})\}} (27)$$

其中, $a = 4/(R_{dc}C_{dc}); b = 2U_{sd}/(U_{dc}C_{dc})_{\circ}$ 

可以设计式(28)所示的开关定律确定 PI 控制 的增益<sup>[21]</sup>,以保证闭环传递函数稳定。

$$\begin{cases} k_{p} = [(1 + \gamma(\sigma_{de}))k_{p+} - (1 - \gamma(\sigma_{de}))k_{p-}] + k_{ap} \\ k_{i} = [(1 + \gamma(\sigma_{de}))k_{i+} - (1 - \gamma(\sigma_{de}))k_{i-}] + k_{ai} \end{cases} (28)$$

其中, $k_{p+}$ 、 $k_{p-}$ 、 $k_{i+}$ 、 $k_{i-}$ 、 $k_{ap}$ 、 $k_{ai}$ 均为正数, 是 PI 控制器整 定后的值; $\gamma(\sigma_{dc})$ 为饱和函数。在式(28)中,当直流 侧电压处于动态状态时, $k_p$ 在[ $k_{ap}-2k_{p-}$ , $k_{ap}+2k_{p+}$ ]范 围内波动,进入稳态后, $k_p$ 保持为 $k_{ap}$ 不变; $k_i$ 与 $k_p$ 同 理,可以确保直流侧电压的稳定。

综上,UPQC-PV直流侧电压的控制框图见图1。



图1 UPQC-PV直流侧电压控制框图

Fig.1 Control block diagram of UPQC-PV DC-side voltage

# 3 UPQC-PV的控制系统

综上所述,可以设计UPQC-PV总体控制框图如图2所示。图中,V<sub>p</sub>、I<sub>p</sub>分别为光伏阵列的电压、电流。由图2可知,该控制系统由正负序分离、无源滑模控制、滑模PI控制器等部分构成。





图 2(a)中串联补偿器检测电源电压畸变大小, 并注入频率相同、相位相同或相位相反的电压稳定 负载电压;图 2(b)中并联补偿器补偿负载侧的电流 谐波、无功功率,减少对电网的污染,同时从光伏阵 列中提取相应的有功功率来稳定直流侧电压。

# 4 UPQC-PV系统仿真分析与实验验证

#### 4.1 仿真分析

在MATLAB / Simulink 平台中对本文所提控制策 略进行仿真。设置 UPQC-PV 相关的仿真参数如下: 电源电压为 380 V,频率为 50 Hz;串联侧, $L_1$ =2 mH, 滤波电容  $C_{f1}$ =5  $\mu$ F, $R_1$ =0.1 Ω;并联侧, $L_2$ =3 mH, $R_2$ = 0.2 Ω;直流侧电容  $C_{dc}$ =5 000  $\mu$ F,串联变压器变比为 1;光伏电池板的额定电压为 350 V,温度为 25 °C。 4.1.1 算例 1

算例1用于测试无源滑模控制的有效性,主要 分电网侧和负载侧进行测试。

(1)测试电网侧出现电压暂降、暂升和谐波情况对负载侧的影响。设置仿真时间为0.6 s, [0.1, 0.3] s内系统出现含量为20%的5次谐波和含量为10%的7次谐波,(0.3, 0.4] s内电网发生电压暂降,暂降幅度为50%,[0.5, 0.6] s内电网发生电压暂升,暂升幅度为30%,负载侧为线性电路。

图3展现了不同控制策略下串联补偿器正序有 功电流 i<sup>\*</sup><sub>d1</sub>跟踪串联补偿器正序有功参考电流 i<sup>\*</sup><sub>d1ref</sub>的 能力,跟踪效果越好,则系统补偿能力越佳。由图可 见,本文所提无源滑模控制的跟踪效果最好,误差最 小,具有优秀的动态性能。



图 3 不同控制策略下 $i_{d1}^+$ 的仿真结果 Fig.3 Simulative results of  $i_{d1}^+$  under different control strategies

当电网侧电压发生电能质量问题时,不同控制 策略下的负载侧电压如图4所示。由图可知,电网 侧电压发生变化时,负载侧电压仍能保持正弦波形 不变,相比于无源控制和传统PI控制,无源滑模控 制下的负载侧电压波形抖动浮动小,响应速度快,并 且无超调。对负载侧电压进行快速傅里叶变换 (FFT),a相结果见图5。结合图4和图5可知,补偿 前三相电压的总谐波畸变率(THD)分别为23.28%、 23.28%、23.29%,采用无源滑模控制补偿后三相电 压的THD分别为2.48%、2.45%,无源控制补 偿后三相电压的THD分别为3.51%、3.50%、3.51%, PI控制补偿后三相电压的THD分别为8.48%、8.45%、 8.41%。可见,本文所提无源滑模控制在电网出现



图5 a相负载侧电压的谐波含量

Fig.5 Harmonic content of phase-a load voltage

电能质量问题时有更好的控制性能和补偿效果。

(2)测试非线性负载突变和负载不平衡状态对 电网电流的影响,仿真设置时长为0.6 s,负载侧为非 线性整流二极管并联10Ω电阻的结构,其中[0.15, 0.25)s内出现负载突变,并联电阻突变为5Ω,测试 系统动态能力下的跟踪性能,0.25 s后系统恢复正 常;[0.4,0.5]s内负载出现不平衡现象,测试系统应 对不平衡负载的能力。

负载突变和负载不平衡状态下的仿真结果见附录C中图C1。由图可知,负载出现不平衡现象后, 采用无源滑模控制时电网侧电流波形较为平滑,电流不平衡度为1.19%,而采用无源控制时电网侧电流波形的不平衡度为3.25%,采用PI控制时电网侧电流的不平衡度为5.24%。经过计算,未经补偿时电网侧三相电流的THD分别为33.80%、33.32%、 33.36%,在无源滑模控制下电网侧三相电流的THD分别为4.20%、3.78%、3.65%,无源控制下电网侧三 相电流的THD分别为6.56%、6.28%、6.94%,而PI控制下电网侧三相电流的THD分别为8.38%、9.77%、10.68%。可见,本文所提无源滑模控制在负载突变 和不平衡状态下均能达到满意的控制效果。

4.1.2 算例2

算例2探究在光照辐射发生变化时系统直流侧的运行情况,主要测试滑模PI控制策略的有效性。 设置仿真时长为0.4 s,电网正常运行,负载侧为整流 二极管,在0.2 s时光照辐射强度由1000 W / m<sup>2</sup>降 至200 W / m<sup>2</sup>。

算例2的仿真结果见附录C中图C2。图C2(a) 为光伏MPPT曲线,在0.2s时光伏功率曲线发生骤 降,随后稳定在1200W。图C2(b)为采用PI控制、 滑模控制<sup>[19]</sup>和滑模PI控制时的直流侧电压波形,由 图可知系统直流侧电压的稳定点为700V,采用PI 控制时直流侧电压超调较大,滑模控制则响应速度 较慢,在0.2s光照辐射强度发生变化时,PI控制下 的直流侧电压抖振较大,有明显的波动。而本文所 提控制能很好地抑制这种波动,且响应速度较快。

考虑到电压干扰对系统会造成一定的影响,特别是对直流侧,为此以下分析电网侧电压暂降以及 光照辐射强度同时改变对UPQC-PV的影响。根据 IEEE 1564—2014标准中对电压暂降的评估,选取 残压为90%、60%、40%这3种情况对UPQC-PV进行 测试。

(1)当残压为90%,即设置电网侧电压在0.2 s 时发生幅值暂降10%,且光照辐射强度发生改变, 仿真结果见附录C中图C3。由图C3(a)可知,滑模 PI控制能稳定直流侧电压为700V,而PI控制下的 直流侧电压存在较大的波动,滑模控制的响应速度 较慢。图C3(b)是不同控制策略下的负载侧电压波 形,由图可见,未经补偿时负载侧三相电压的THD 分别为2.99%、3.52%、3.52%,PI控制下负载侧三相 电压的THD分别为1.01%、0.85%、1.10%,滑模控制 下负载侧三相电压的THD分别为1.00%、0.83%、 1.08%,而滑模PI控制下负载侧三相电压的THD分 别为0.93%、0.8%、1.01%,并且直流侧电压控制较 为稳定,可见采用滑模PI控制对系统解决电能质量 问题是有效的。

(2)残压为60%时的仿真结果如图6所示。由 图6(a)可以看出,PI控制在0.2s后没有将直流侧电 压稳定在700V,滑模控制则会出现抖振现象,而滑 模 PI控制经过0.1s后将直流侧电压重新稳定在 700V,抖振幅度较小;由图6(b)可以看出,PI控制下 的负载侧电压波形存在畸变。未经补偿时负载侧 三相电压的THD分别为15.80%、18.62%、18.63%,PI 控制下负载侧三相电压的THD分别为7.63%、 7.62%、7.79%,滑模控制下负载侧三相电压的THD 分别为4.05%、4.41%、4.19%,而滑模PI控制下负载 侧三相电压的THD分别为2.22%、2.21%、2.68%。

(3)残压为40%时的仿真结果见附录C中图



图 6 残压为 60% 时的仿真结果

Fig.6 Simulative results when residual voltage is 60%

C4。由图 C4(a)可知,在 0.2 s时,PI 控制的超调很 大,不能及时稳定直流侧电压,而滑模控制的恢复时 间较长;根据图 C4(b)所示不同控制下的负载侧电 压,经过计算可得,未经补偿时负载侧三相电压的 THD 分别为 30.16%、35.54%、35.56%,滑模 PI 控制 下负载侧三相电压的 THD 分别为 4.52%、4.65%、 4.88%,滑模控制下负载侧三相电压的 THD 分别为 5.50%、6.45%、6.56%,PI 控制下负载侧三相电压的 THD 分别为 8.02%、8.16%、8.61%,可见相较于其他 控制策略,本文所提控制策略能在发生严重电压暂 降时更好地稳定直流侧电压,使 UPQC-PV 的补偿效 果更好。

#### 4.2 实验验证

基于dSPACE实验平台搭建UPQC-PV进行实验 验证,平台的电压等级为380V,通过Chroma可编程 电网模拟器为UPQC-PV供电,输出频率为50Hz,输 出电压为220V。控制算法使用dSPACE控制器实 现。非线性负载采用Chroma的可编程交/直流电 子负载,通过设置其交流模式下的整流负载模式。

在实验过程中,设置电压暂降30%,光照辐射 强度不发生变化,本文所提控制策略的实验结果见 附录D中图D1。由图D1(a)可知,当发生电压暂降 时,负载侧电压仍能保持在正常幅值,未发生暂降,从 而保证负载的运行稳定;由图D1(b)可知,电源电流 保持正弦,未受到非线性负载的影响,同时直流侧电 压在滑模PI控制下小幅下滑10V后重新保持稳定。

设置电压暂降30%,采用Chroma光伏模拟器模 拟光伏阵列的输出特性,设置光照辐射强度暂降为 500 W / m<sup>2</sup>,该工况下的实验结果见附录D中图D2。 由图可知:在PI控制下,直流侧电压下降了60 V 才 缓慢上升,并且响应速度较慢,负载侧电压有较小的 畸变;在滑模控制下,直流侧电压抖振较为明显;而 在滑模 PI控制下直流侧电压波动较小,负载电压畸 变较小。实验结果和仿真结果一致,验证了本文所 提控制策略在 UPQC-PV 中的优越性和可行性。

# 5 结论

现有 UPQC-PV 主要存在以下 2 个问题:一是系统对电能质量的补偿不够精确、快速;二是直流侧电压不稳定。本文针对这 2 个问题进行研究:首先,针对第一个问题提出正负序无源滑模控制策略,相比于 PI 控制和无源控制,所提控制策略能提高 UPQC的基本功能、响应速度和补偿精度;然后,针对第二个问题,基于滑模 PI 控制设计了 UPQC-PV 的直流侧控制器,其能够稳定直流侧电压,降低直流侧波动对系统的影响,使得 UPQC-PV 的整体性能得到改善;最后,通过仿真和实验验证了无源滑模控制和滑模 PI 控制在 UPQC-PV 中的有效性和优越性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 谭真,罗隆福,崔贵平,等. 耦合可控电抗器的统一电能质量控制器[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):101-105.
   TAN Zhen,LUO Longfu,CUI Guiping, et al. UPQC with coupled controllable reactors[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(1):101-105.
- [2]黄晓明,范志华,刘子文,等.基于有功和无功功率协调分配的 统一电能质量调节器控制策略[J].电力自动化设备,2018,38 (3):177-183.
  HUANG Xiaoming,FAN Zhihua,LIU Ziwen,et al. Control strategy of UPQC based on active and reactive power coordination distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(3):177-183.
- [3] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [4] KHADEM S K, BASU M, CONLON M F. Intelligent islanding and seamless reconnection technique for microgrid with UPQC
   [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2):483-492.
- [5] KHADEM S K, BASU M, CONLON M F. A comparative analysis of placement and control of UPQC in DG integrated grid connected network[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2016,6:46-57.
- [6] 罗隆福,周颖启,邹津海.基于V/v变压器同相牵引供电的新型补偿系统[J].电力自动化设备,2018,38(12):86-93.
   LUO Longfu,ZHOU Yingqi,ZOU Jinhai. A new compensation system for V/v co-phase traction power supply[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):86-93.

 [7]马茜,王文立,许倩. 储能式统一电能质量控制器负载电压全 补偿容量配置策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(20):90-96.
 MA Qian,WANG Wenli,XU Qian. Capacity allocation strategy for full compensation of load voltage in unified power quality controller with energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(20):90-96.

112

- [8] 蒋玮,陈武,胡仁杰.基于超级电容器储能的微网统一电能质量调节器[J].电力自动化设备,2014,34(1):85-90.
   JIANG Wei,CHEN Wu,HU Renjie. United power quality conditioner based on supercapacitor for microgird[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):85-90.
- [9] DEVASSY S, SINGH B. Enhancement of power quality using solar PV integrated UPQC [C] //2015 39th National Power Systems Conference(NSC). Noida, India: IEEE, 2015:1-6.
- [10] PALANISAMY K, KOTHARI D P, MISHRA M K, et al. Effective utilization of unified power quality conditioner for interconnecting PV modules with grid using power angle control method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 48: 131-138.
- [11] DEVASSY S, SINGH B. Discrete SOGI based control of solar photovoltaic integrated unified power quality conditioner[C]// 2016 National Power Systems Conference (NPSC). Bhubaneswar, India: IEEE, 2016:1-6.
- [12] DEVASSY S, SINGH B. Modified pq-theory-based control of solar-PV-integrated UPQC-S[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5):5031-5040.
- [13] PATEL A, MATHUR H D, BHANOT S. A new SRF-based power angle control method for UPQC-DG to integrate solar PV into grid[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(1):e2667.1-e2667.16.
- [14] DEVASSY S, SINGH B. Control of solar photovoltaic integrated UPQC operating in polluted utility conditions[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(12):1413-1421.
- [15] DEVASSY S, SINGH B. Design and performance analysis of three-phase solar PV integrated UPQC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1):73-81.
- [16] REISI A R, MORADI M H, SHOWKATI H. Combined photo-

voltaic and unified power quality controller to improve power quality[J]. Solar Energy, 2013, 88:154-162.

- [17] NI F Y, LI Z M, WANG Q. The voltage control strategy of a DC-link bus integrated photovoltaic charging module in a unified power quality conditioner [J]. Energies, 2019, 12(10): 1842.
- [18] CAMPANHOL L B G, DA SILVA S A O, DE OLIVEIRA A A, et al. Single-stage three-phase grid-tied PV system with universal filtering capability applied to DG systems and AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12):9131-9142.
- [19] DASH S K, RAY P K. Novel PV-tied UPQC topology based on a new model reference control scheme and integral plus sliding mode DC-link controller[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(7):e2564.1-e2564.26.
- [20] 谭智力,朱冬姣. 一种 UPQC 直流侧电压控制器的设计方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(22):190-195.
   TAN Zhili,ZHU Dongjiao. Design of voltage controller for UPQC on its DC side[J]. Power System Protection and Control,2010,38(22):190-195.
- [21] RIBEIRO R L D A, ROCHA T D O A, SOUSA R M D, et al. A robust DC-link voltage control strategy to enhance the performance of shunt active power filters without harmonic detection schemes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2):803-813.

#### 作者简介:



叶剑桥

叶剑桥(1995—),男,安徽淮南人,硕 士研究生,主要研究方向为微电网控制和 电能质量控制(E-mail:yejianqiao1122@qq. com);

周建萍(1978—), 女, 江西萍乡人, 副 教授, 博士, 主要研究方向为电力电子技术 和微电网技术(**E-mail**: zhoujianping@shiep. edu.cn)。

(编辑 陆丹)

# Control strategy of UPQC-PV based on passive sliding mode and sliding mode PI

YE Jianqiao, ZHOU Jianping, MAO Dajun, GE Xiangyi, ZHANG Jian, FANG Le

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract**: The UPQC-PV(Unified Power Quality Conditioner integrated with PhotoVoltaic) based on the traditional control methods has low compensation efficiency and accuracy, and the DC-side voltage is vulnerable to external interference, so a passive sliding mode and sliding mode PI control-based DC-side control strategy is proposed for UPQC-PV. Firstly, based on the mathematical model of unified power quality conditioner, the positive and negative sequence passive sliding mode controller based on Euler-Lagrange model is designed to solve the passive control's problem of weak anti-interference ability, which improves the system response speed, compensation accuracy and anti-interference ability. Then, the sliding mode PI control is adopted to reduce the influence of photovoltaic fluctuation on the system, stabilize the DC-side voltage of the system, and further improve the overall performance of the system. Finally, the superiority and effectiveness of the proposed DC-side control strategy are verified by simulation and experiment under the conditions of power grid imbalance, sudden load change, load imbalance, light intensity change, and so on.

Key words: UPQC-PV; passive sliding mode control; sliding mode PI control; positive and negative sequence separation; power quality

# 附录 A



Fig.A1 Topology structure of UPQC-PV

附录 B

串联侧 EL 模型参数如下:

$$\boldsymbol{M}_{1} = \begin{bmatrix} L_{1} & 0\\ 0 & L_{1} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{J}_{1}^{+} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_{1}\\ \omega L_{1} & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{J}_{1}^{-} = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_{1}\\ -\omega L_{1} & 0 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{R}_{1} = \begin{bmatrix} R_{1} & 0\\ 0 & R_{1} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{u}_{1}^{+} = \begin{bmatrix} U_{d1}^{+} - U_{cd}^{+}\\ U_{q1}^{+} - U_{cq}^{+} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{u}_{1}^{-} = \begin{bmatrix} U_{d1}^{-} - U_{cd}^{-}\\ U_{q1}^{-} - U_{cq}^{-} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{x}_{1}^{+} = \begin{bmatrix} i_{d1}^{+}\\ i_{q1}^{+} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{x}_{1}^{-} = \begin{bmatrix} i_{d1}^{-}\\ i_{q1}^{-} \end{bmatrix}$$

并联侧 EL 模型参数如下:

$$\boldsymbol{M}_{2} = \begin{bmatrix} L_{2} & 0 \\ 0 & L_{2} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{J}_{2}^{+} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_{2} \\ \omega L_{2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{J}_{2}^{-} = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_{2} \\ -\omega L_{2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{R}_{2} = \begin{bmatrix} R_{2} & 0 \\ 0 & R_{2} \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{u}_{2}^{+} = \begin{bmatrix} U_{d2}^{+} - U_{Ld}^{+} \\ U_{q2}^{+} - U_{Lq}^{+} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{u}_{2}^{-} = \begin{bmatrix} U_{d2}^{-} - U_{Ld}^{-} \\ U_{q2}^{-} - U_{Lq}^{-} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{x}_{2}^{+} = \begin{bmatrix} i_{d2}^{+} \\ i_{q2}^{+} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{x}_{2}^{-} = \begin{bmatrix} i_{d2}^{-} \\ i_{q2}^{-} \end{bmatrix}$$

附录 C





Fig.C1 Simulation waveforms of grid-side and load-side current



Fig.C2 Simulative results when light intensity changes





Fig.C3 Simulative results when voltage sag is 10% and light intensity changes



Fig.C4 Simulative results when voltage sag is 60% and light intensity changes

附录 D





Fig.D1 Experimental results of proposed control strategy when voltage sag occurs





Fig.D2 Experimental results of DC-side and load-side voltage