

# 电网不平衡故障下风电并网变流器的控制综述

刘军<sup>1</sup>,赵晨聪<sup>1</sup>,谢宙桦<sup>2</sup>,周飞航<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:**在电网电压发生不平衡故障情况下,由于引入了负序分量,导致了直流母线电压以及并网变流器输出功率产生二倍频的波动,交流输入电流产生谐波畸变。为了保证风电系统在电网不平衡故障下正常运行并提高风电并网变流器的并网电流质量,研究电网不平衡故障下的风电并网变流器控制策略已成为了迫切需求。在电网不平衡故障下,针对正负序分量的分离、控制目标的选取、电流参考值的计算、电流内环/功率内环的控制以及谐波控制等并网变流器控制的关键技术方面,对现有文献的控制策略进行综述。

**关键词:**电网不平衡;并网变流器;控制策略;综述

**中图分类号:**TM31 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19489

## An Overview on Control of Wind Power Grid-connected Inverter Under Unbalanced Grid Fault

LIU Jun<sup>1</sup>, ZHAO Chencong<sup>1</sup>, XIE Zhouhua<sup>2</sup>, ZHOU Feihang<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** In the case of unbalanced power grid, due to the introduction of negative sequence components, the DC bus voltage and the output power of grid-connected inverter will generate secondary fluctuation, and the input current will produce harmonic distortion. In order to ensure normal operation of wind power system under unbalanced grid fault and improve the grid-connected current quality of grid-connected inverter, it is urgent to study the control strategy of grid connected inverter under unbalanced grid fault. Under the unbalanced grid fault, aiming at the following important technical aspects that separation of positive and negative sequence components, selection of control targets, the calculation for the reference value of the current, control of current inner loop/power inner loop and the control of harmonic, an overview of the control strategies of the existing literatures was present and evaluated.

**Key words:** unbalance grid voltage; grid-connected inverter; control strategy; overview

近些年来,与煤炭和褐煤能源的增速相比,可再生能源在过去的数年里每年的增长率均超过30%,是增长速度最快的能源之一。在可再生能源中,由于风电具有资源丰富、产业基础好、环境影响微小等优势,在我国发电装机容量的比重逐年提升,直至2017年上半年我国风电新增并网容量已达6.01 GW,同比增长了12%。由于风电系统的迅猛发展,相关的并网技术也随之成为研究热点。并网变流器作为风电以及大规模储能系统的并网接口,对风电系统的并网控制起着举足轻重的作用。

电压源并网变流器(voltage source grid-con-

nected inverter, VSI)属于一种低谐波污染变流器<sup>[1]</sup>,不仅能够实现单位功率因数运行,而且具有快速的动态响应能力,能够实现电能能量的双向流动。鉴于上述优点,VSI被广泛应用于风电系统中。

在电网发生不平衡故障情况时,电网中将会产生负序电压分量,但理想情况下对VSI的控制并未考虑负序电压的影响,因此会导致并网电流产生畸变,污染电网,危害其他用电设备,并将造成直流母线电压及输出有功功率、无功功率出现二倍频波动,并通过机侧PWM变流器在发电机转子中产生较大的谐波电流,导致发电机损耗增

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2017GY-061)

作者简介:刘军(1963—),男,博士,教授,Email:liujun0310@sina.com.

大,严重时会使系统性能严重恶化<sup>[2]</sup>。因此,研究不平衡电网故障下VSI的控制策略十分必要。

本文主要针对电网电压不平衡故障下风电VSI控制中的关键技术方面,即正负序分量的分离、控制目标的选取、电流参考值的计算、电流(功率)内环控制策略以及电网电压畸变不平衡故障下的控制等问题进行了详细地分析探讨。

## 1 不平衡电网下并网变流器模型

VSI的基本结构图如图1所示。

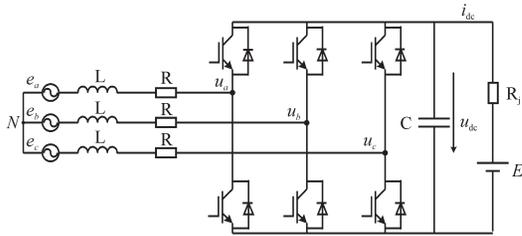


图1 VSI基本结构图

Fig.1 The basic structure diagram of VSI

在电网电压发生不平衡故障时,根据对称分量法可将电压分解为正序分量、负序分量和零序分量,但是对于三相三线制系统,无零序分量的流通过路径,所以不考虑零序分量。电网在不平衡故障下VSI的输出瞬时有功功率及无功功率为

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_0 \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_d^+ & e_q^+ & e_d^- & e_q^- \\ e_d^- & e_q^- & e_d^+ & e_q^+ \\ e_q^- & -e_d^- & -e_q^+ & e_d^+ \\ e_q^+ & -e_d^+ & e_q^- & -e_d^- \\ e_q^- & -e_d^- & e_q^+ & -e_d^+ \\ -e_d^- & -e_q^- & e_d^+ & e_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix}$$

式中: $P_0, Q_0$ 分别为有功、无功功率的直流分量; $P_{c2}, P_{s2}, Q_{c2}, Q_{s2}$ 分别为有功、无功功率的二倍频分量幅值; $e_d^+, e_q^+, e_d^-, e_q^-$ 及 $i_d^+, i_q^+, i_d^-, i_q^-$ 分别为 $d, q$ 轴上的正、负序电压分量及电流分量。

由式(1)可以看出,功率和电流构成了一个以 $6 \times 4$ 矩阵为系数的函数关系<sup>[3]</sup>,通过4个电流变量无法同时控制6个功率变量,因此需根据情况选择不同的控制目标并得到相应电流参考值<sup>[4-6]</sup>。

## 2 电网不平衡下VSI控制关键问题

### 2.1 正、负序分量的分离

若电网电压不平衡,则会引入负序分量,如

何准确快速地进行正、负序分离是系统控制中的关键部分,同时也是实现电网同步检测的基础环节。目前对不平衡故障下的正、负序分离主要有以下几种方法:

1)对称分量法。该方法主要以电力系统中的“对称分量法”为基础,需要将信号相移 $120^\circ$ ,引入复数算子 $a$ ,通过对称分量矩阵后可算出正、负序分量,但该方法的计算过程较为复杂<sup>[7-9]</sup>。

2)滤波器方法。由于正序分量在正向旋转坐标系中表现为直流量形式,而负序分量则表现为二倍频的波动形式,所以可设计二次陷波器,滤除掉二次信号即可达到正、负序分量分离的目的。但陷波器参数设计以及数字实现比较困难,对系统的动态性能会产生影响。文献[10-13]提出了一种新型的基于复数滤波器的正、负序分离方法,原理简单,实现方便,运算量小。

3)信号延时法。该方法根据电气量在不平衡电网电压下的解析表达式,利用信号延迟及三角函数的相关计算方法分解出正、负序分量,算法结构简洁,思路清晰,但引入了至少 $T/4$ 延时<sup>[14-15]</sup>。基于 $T/4$ 延时的思路,文献[16]提出了 $T/16$ 延时法,虽然缩短了延时,但仍无法达到更高的快速性。文献[17]提出了任意延迟 $T/n$ 的分离方法,可选择任意的 $n$ 来提高分离的快速性, $n$ 取值较大时,几乎不存在延时,但在动态过程中正、负序分离计算的超调也会随之增大,会对控制不利,需要对其进行限幅处理。

4)双旋转坐标变换法。该方法将不对称电压旋转变换到两相同步旋转坐标系下,在正负序同步旋转坐标系下通过正、负序解耦实现正、负序分量的分离,该方法具有较好的稳态和动态性能,但是结构较复杂,运算量较大<sup>[18-19]</sup>。

### 2.2 控制目标的选取

电网电压不平衡情况下,需要根据不同的情况选择不同的控制目标实现对VSI的控制。电网不平衡故障下,主要有以下控制目标<sup>[5,20]</sup>:有功功率恒定控制、无功功率恒定控制、电流平衡控制。

基于功率平衡原理可知,由于电网电压的不平衡,若要保证功率无二倍频的波动,则电流必然是不平衡的,所以功率无波动和并网电流平衡无畸变是无法同时实现的。针对该问题,如何进行协调控制具有一定的研究意义。文献[21-22]在电流参考值中引入系数,通过对系数的调节,实现功率和电流的协调控制,但是并未对系数进

行优化。文献[23]提出了一种多目标协调控制策略,对于有功、无功功率恒定以及电流平衡这3种独立的控制目标建立了统一的解析表达式,并通过神经网络对引入系数进行调节优化,达到兼顾多个控制目标的目的。由于功率恒定与电流平衡无法同时实现,文献[24-25]提出了一种新型无功功率的概念,实现了电流平衡无畸变,并消除有功和新型无功功率的二倍频波动。

随着VSI功能的越发强大,VSI不仅需要理想电网条件下保证单位功率因数运行,而且还应在电网不平衡故障下实现对电网的支撑作用,基于此方面,文献[26-27]在电网不平衡故障下向电网注入无功功率,通过调节参考电流中的权重系数 $k$ ,对不平衡电网电压进行提升或均衡,充分发挥了VSI的无功支撑能力。应当注意的是,在电网不平衡故障下,由于1相或同时几相发生电压跌落,为了能够继续向电网输送额定的有功功率,并网输入电流则会增大,要实现VSI的故障穿越,并网电流的最大值不能超限,因此需要进行限流控制<sup>[28-31]</sup>。其中文献[31]量化分析了电网故障下峰值电流超限的原因,并提出了一种通过电流参考值与正序电压的计算来替代原有功率参考值的控制方案,实验结果表明:该限流控制方案峰值电流被有效地控制在额定值以内,进而保证VSI成功实现故障穿越。

### 2.3 参考电流的计算

电流参考值的计算是影响VSI控制性能的重要环节,本节针对主要控制目标讨论其参考电流值的计算。回顾瞬时功率理论,瞬时有功功率及无功功率可表示为

$$p = e \cdot i \quad (2)$$

$$q = |e \times i| \quad (3)$$

将式(3)转化为点乘的形式,可表示为

$$q = e_{\perp} \cdot i \quad (4)$$

式中: $e_{\perp}$ 为与电压 $e$ 正交的分量(超前 $90^{\circ}$ )。

在电网电压不平衡下,基于对称分量理论可将电压和电流表示为

$$e = e^{+} + e^{-} \quad (5)$$

$$i = i^{+} + i^{-} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(2)、式(3)即可得

$$p = \underbrace{e^{+} \cdot i^{+} + e^{-} \cdot i^{-}}_{\bar{p}} + \underbrace{e^{+} \cdot i^{-} + e^{-} \cdot i^{+}}_{\tilde{p}} \quad (7)$$

$$q = \underbrace{e_{\perp}^{+} \cdot i^{+} + e_{\perp}^{-} \cdot i^{-}}_{\bar{q}} + \underbrace{e_{\perp}^{+} \cdot i^{-} + e_{\perp}^{-} \cdot i^{+}}_{\tilde{q}} \quad (8)$$

式中: $\bar{p}$ 、 $\tilde{p}$ 和 $\bar{q}$ 、 $\tilde{q}$ 分别为有功和无功功率的直流

分量及波动分量。

由式(7)、式(8)可知,有功和无功功率都是由直流分量和波动分量组成的。

#### 2.3.1 有功功率恒定控制

该控制策略可有效抑制电网不平衡故障下的有功功率二倍频波动,保证输出恒定的有功功率和直流母线电压无波动。该控制目标下的电流参考值如下<sup>[32-34]</sup>:

$$i_p^{\text{ref}} = \frac{P^{\text{ref}}}{|e^{+}|^2 - |e^{-}|^2} (e^{+} - e^{-}) \quad (9)$$

$$i_q^{\text{ref}} = \frac{Q^{\text{ref}}}{|e^{+}|^2 - |e^{-}|^2} (e_{\perp}^{+} - e_{\perp}^{-}) \quad (10)$$

式中: $i_p^{\text{ref}}$ 、 $i_q^{\text{ref}}$ 分别为有功、无功电流参考值。

基于此,瞬时功率可表示为

$$p = \underbrace{e^{+} \cdot i_p^{\text{ref}} + e^{-} \cdot i_p^{\text{ref}}}_{\bar{p}} + \underbrace{e^{+} \cdot i_q^{\text{ref}} + e^{-} \cdot i_q^{\text{ref}}}_{\tilde{p}} \quad (11)$$

$$q = \underbrace{e_{\perp}^{+} \cdot i_q^{\text{ref}} + e_{\perp}^{-} \cdot i_q^{\text{ref}}}_{\bar{q}} + \underbrace{e_{\perp}^{+} \cdot i_p^{\text{ref}} + e_{\perp}^{-} \cdot i_p^{\text{ref}}}_{\tilde{q}} \quad (12)$$

根据式(11)可看出,有功功率波动项 $\tilde{p}$ 和无功的电流分量 $i_q^{\text{ref}}$ 有关,所以若要保持有功功率恒定,即只需设置无功功率的参考值 $Q^{\text{ref}}$ 为零。则式(11)和式(12)可以化简如下:

$$p = \underbrace{e^{+} \cdot i_p^{\text{ref}} + e^{-} \cdot i_p^{\text{ref}}}_{\bar{p}} \quad (13)$$

$$q = \underbrace{e_{\perp}^{+} \cdot i_p^{\text{ref}} + e_{\perp}^{-} \cdot i_p^{\text{ref}}}_{\tilde{q}} \quad (14)$$

即在有功功率恒定控制下,有功功率的波动被有效地消除,但在该控制目标下,无功功率存在波动,而且不平衡的并网电流被注入电网。

#### 2.3.2 无功功率恒定控制

该控制目标类似于有功功率恒定控制,电流参考值的计算见式(9)、式(10)。由于瞬时无功功率的波动项与有功电流分量 $i_p^{\text{ref}}$ 有关,类似地,即只需设置 $P^{\text{ref}}$ 为零<sup>[35-36]</sup>,即可获得恒定的无功功率,如下式:

$$p = \underbrace{e^{+} \cdot i_q^{\text{ref}} + e^{-} \cdot i_q^{\text{ref}}}_{\bar{p}} \quad (15)$$

$$q = \underbrace{e_{\perp}^{+} \cdot i_q^{\text{ref}} + e_{\perp}^{-} \cdot i_q^{\text{ref}}}_{\bar{q}} \quad (16)$$

然而,为了对电网提供一定的有功功率,根据文献[37]对有功电流参考值 $i_p^{\text{ref}}$ 进行修正如下:

$$i_p^{\text{ref}} = \frac{P^{\text{ref}}}{|e^{+}|^2 + |e^{-}|^2} (e^{+} + e^{-}) \quad (17)$$

即在电网电压不平衡状态下,若要实现无功功率的恒定控制,则可通过式(17)和式(10)实现电流

参考值的计算。在该控制目标下,无功功率的波动被消除,但是有功功率仍然存在波动,不平衡的并网电流仍被注入电网。

### 2.3.3 平衡电流控制

电网电压不平衡情况下,若采用该控制策略,则平衡且正弦的并网电流将会被注入电网<sup>[33,38-41]</sup>。为了实现该控制目标,设置电流负序分量为零。平衡电流控制目标下的电流参考值计算如下:

$$i_p^{\text{ref}} = i_p^{+\text{ref}} = \frac{P^{\text{ref}}}{|e^+|^2} e^+ \quad (18)$$

$$i_q^{\text{ref}} = i_q^{+\text{ref}} = \frac{Q^{\text{ref}}}{|e^+|^2} e_\perp^+ \quad (19)$$

此时瞬时功率可化简为

$$p = \underbrace{e^+ \cdot i_p^{+\text{ref}}}_{\tilde{p}} + \underbrace{e^- \cdot i_p^{-\text{ref}}}_{\tilde{p}} \quad (20)$$

$$q = \underbrace{e_\perp^+ \cdot i_q^{+\text{ref}}}_{\tilde{q}} + \underbrace{e_\perp^- \cdot i_q^{-\text{ref}}}_{\tilde{q}} \quad (21)$$

根据式(20)和(21)可知,若采用平衡电流控制,瞬时有功和无功功率中都会存在波动。

### 2.3.4 柔性功率波动控制

基于对上述3种控制目标的分析,为了实现3种控制目标的协调控制,引入系数 $k_p$ 和 $k_q$ 对其电流参考值进行调整<sup>[34,42-44]</sup>。电流参考值计算如下:

$$i_p^{\text{ref}} = \frac{P^{\text{ref}}}{|e^+|^2 + k_p |e^-|^2} (e^+ + k_p e^-) \quad (22)$$

$$i_q^{\text{ref}} = \frac{Q^{\text{ref}}}{|e^+|^2 + k_q |e^-|^2} (e_\perp^+ + k_q e_\perp^-) \quad (23)$$

基于瞬时功率式(7)和式(8),通过式(22)和式(23)可得有功和无功功率的波动分量为

$$\tilde{P} = \underbrace{\frac{(1+k_p)P^{\text{ref}}}{D_p} e^+ e^-}_{\tilde{P}_p} + \underbrace{\frac{(1-k_q)Q^{\text{ref}}}{D_q} e_\perp^+ e_\perp^-}_{\tilde{P}_q} \quad (24)$$

$$\tilde{Q} = \underbrace{\frac{(1+k_q)Q^{\text{ref}}}{D_q} e_\perp^+ e_\perp^-}_{\tilde{Q}_q} + \underbrace{\frac{(1-k_p)P^{\text{ref}}}{D_p} e^+ e_\perp^-}_{\tilde{Q}_p} \quad (25)$$

其中

$$\begin{cases} D_p = |e^+|^2 + k_p |e^-|^2 \\ D_q = |e^+|^2 + k_q |e^-|^2 \end{cases}$$

式中: $\tilde{P}_p, \tilde{Q}_p$ 为通过注入有功功率导致的波动; $\tilde{P}_q, \tilde{Q}_q$ 为通过注入无功功率而导致的波动分量。

基于此,可通过调整系数 $k_p$ 和 $k_q$ 灵活切变上述3种控制目标。当设置 $k_p=-1, k_q=1$ 时,即相当于有功功率恒定控制;当设置 $k_p=1, k_q=-1$ 时,相当于无功功率恒定控制;当设置 $k_p=k_q=0$ 时,此时相

当于平衡电流控制。但是应当注意的是,若采用此方法计算电流参考值,则有功和无功功率的恒定控制是不能同时实现的,若有功功率波动被消除,则必导致无功功率存在波动,反之亦然。

### 2.3.5 有功、无功功率恒定控制

在电网电压不平衡故障下,若要同时实现有功和无功功率的恒定控制,则电流参考值的计算方法如下<sup>[32,34,45]</sup>:

$$i_p^{\text{ref}} = \frac{P^{\text{ref}}}{|e|^2} e \quad (26)$$

$$i_q^{\text{ref}} = \frac{Q^{\text{ref}}}{|e|^2} e_\perp \quad (27)$$

基于此,瞬时有功功率和无功功率可化简为

$$p = \underbrace{e^+ \cdot i_p^{\text{ref}}}_{\tilde{p}} \quad (28)$$

$$q = \underbrace{e_\perp^+ \cdot i_q^{\text{ref}}}_{\tilde{q}} \quad (29)$$

在该控制策略下,有功和无功功率的波动均被抑制,同时实现了有功和无功功率的恒定控制,但并网电流存在畸变。

### 2.3.6 支撑电网控制

随着风电装机容量的增大,对VSI的要求也随之提高。在电网电压不平衡故障情况下,风电机组不仅需要抑制外部电压的扰动,还需要在电网电压跌落的情况下对其电压进行无功支撑,降低电压不平衡度。

简化的并网系统结构图如图2所示,其中, $e$ 为电网公共接入点的电压; $e_g$ 为电网电压; $R_g$ 及 $L_g$ 分别为线路中的电阻及电感。

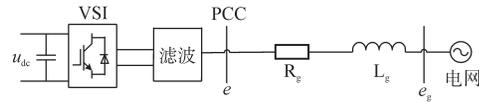


图2 并网系统结构简化图

Fig.2 Simplified diagram of grid connected system

电力系统公共连接点PCC与电网之间的电压表达式为

$$e = e_g + R_g i + L_g \frac{di}{dt} \quad (30)$$

基于该电压方程,首先不考虑电阻,进而分析讨论无功电流对电压的作用。结合对称分量法,该电压方程可简化为

$$|e^+| = |e_g^+| + \omega L_g |i_q^+| \quad (31)$$

$$|e^-| = |e_g^-| - \omega L_g |i_q^-| \quad (32)$$

根据式(31)、式(32)可知,若向电网注入正序无功电流即可提升PCC处正序电压,若向电网

注入负序无功电流可减小负序电压,即可减小电压的不平衡度。

根据式(8)中的无功功率恒定分量  $\bar{Q}$  表达式可知,其由2部分组成,一部分是相关于正序电流分量,另一部分是相关于负序电流分量,即  $\bar{Q}$  可分为正序无功功率和负序无功功率,表达式如下:

$$\begin{cases} Q^+ = e_{\perp}^+ \cdot i^+ \\ Q^- = e_{\perp}^- \cdot i^- \end{cases} \quad (33)$$

基于式(31)~式(33),在电网电压不平衡故障下可通过2方面对其进行电压支撑,一方面是通过注入正序无功功率来提升电网整体电压,另一方面是通过注入负序无功功率来降低电压的不平衡度,进而达到均衡电压的目的<sup>[46-49]</sup>。

考虑到在实际的低电压电网中,网络阻抗主要呈现出阻性<sup>[50]</sup>,若只考虑上述的感性作用,效果欠佳。因此,在此暂时先忽略电感,只考虑电阻对电压支撑的作用,式(30)可简化为

$$|e^+| = |e_g^+| + R_g |i_p^+| \quad (34)$$

$$|e^-| = |e_g^-| + R_g |i_p^-| \quad (35)$$

分析式(34)、式(35)可知,若向电网注入正序有功电流,则会对电压起到提升作用,若减小注入电网的负序有功电流,电压的不平衡度将会降低,即可起到均衡电压的作用。类似于上述所提的无功功率,有功功率也可分为正序有功功率和负序有功功率2方面来实现对电压的提升或均衡。

通过上述分析,可结合正序和负序功率,达到提升电压或者均衡电压的目的。为了实现正、负序功率间的灵活控制,在计算电流参考值的过程中可引入系数  $k_p$  和  $k_q$ , 电流参考值计算如下<sup>[32, 43-44, 49, 51-54]</sup>:

$$i_p^{\text{ref}} = k_p \frac{P^{\text{ref}}}{|e^+|^2} e^+ + (1 - k_p) \frac{P^{\text{ref}}}{|e^-|^2} e^- \quad (36)$$

$$i_Q^{\text{ref}} = k_q \frac{Q^{\text{ref}}}{|e^+|^2} e_{\perp}^+ + (1 - k_q) \frac{Q^{\text{ref}}}{|e^-|^2} e_{\perp}^- \quad (37)$$

此时,系统瞬时有功功率和无功功率为

$$\begin{aligned} p &= \underbrace{\frac{k_p P^{\text{ref}}}{|e^+|^2}}_{p^+} + \underbrace{\frac{(1 - k_p) P^{\text{ref}}}{|e^-|^2}}_{p^-} + \\ &\quad \underbrace{\left[ \frac{k_p P^{\text{ref}}}{|e^+|^2} + \frac{(1 - k_p) P^{\text{ref}}}{|e^-|^2} \right]}_{\bar{P}_p} e^+ \cdot e^- + \\ &\quad \underbrace{\left[ \frac{k_q Q^{\text{ref}}}{|e^+|^2} - \frac{(1 - k_q) Q^{\text{ref}}}{|e^-|^2} \right]}_{\bar{P}_q} e_{\perp}^+ \cdot e^- \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} q &= \underbrace{\frac{k_q Q^{\text{ref}}}{|e^+|^2}}_{Q^+} + \underbrace{\frac{(1 - k_q) Q^{\text{ref}}}{|e^-|^2}}_{Q^-} + \\ &\quad \underbrace{\left[ \frac{k_q Q^{\text{ref}}}{|e^+|^2} + \frac{(1 - k_q) Q^{\text{ref}}}{|e^-|^2} \right]}_{\bar{Q}_q} e_{\perp}^+ \cdot e_{\perp}^- + \\ &\quad \underbrace{\left[ \frac{k_p P^{\text{ref}}}{|e^+|^2} - \frac{(1 - k_p) P^{\text{ref}}}{|e^-|^2} \right]}_{\bar{Q}_p} e^+ \cdot e^- \end{aligned} \quad (39)$$

由式(38)、式(39)可知:

$$\begin{cases} \frac{P^+}{P^-} = \frac{k_p}{1 - k_p} \\ \frac{Q^+}{Q^-} = \frac{k_q}{1 - k_q} \end{cases} \quad (40)$$

基于式(40),不难看出,若  $k_p=1$  时,则有功功率的注入仅通过正序有功分量来实现;若  $k_p=0$ ,则仅注入负序有功功率分量。同理,  $k_q=1$ ,则会向电网注入正序无功功率分量来提升电压;  $k_q=0$ ,则注入负序无功功率分量达到均衡电压降低电压不平衡度的目的。同时可由式(40)看出,决定正、负序功率的注入仅和参数  $k_p$  和  $k_q$  有关,不受电压跌落程度的约束,灵活性强。

### 3 电网电压不平衡故障下VSI的控制

#### 3.1 电网电压不平衡故障下VSI控制概述

电网不平衡故障下VSI双闭环控制结构框图如图3所示。

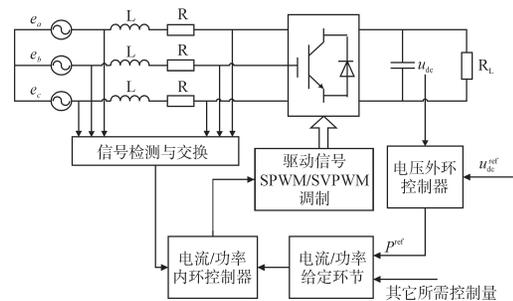


图3 VSI控制框图

Fig.3 Block diagram of VSI control

针对电网电压不平衡故障下对VSI的控制采用双闭环控制策略,控制结构大多为直流电压外环,电流(功率)内环。电压外环主要用于控制直流母线电压稳定。在外环控制中常采用PI控制器来实现对母线电压的有效控制。为了进一步提高抑制母线电压二倍频波动的能力,比例积分谐振(PIR)控制器<sup>[4]</sup>等能对交流信号进行有效控制的控制器也被应用于母线电压的控制中。为

提高系统的鲁棒性,文献[5,23]在外环母线电压的控制中引入了神经网络等智能控制方法。电压外环控制器的输出为有功功率的参考值,由该参考值结合控制所需的其它量即可得出内环电流(功率)给定值,电流(功率)给定值与实际值的偏差经过内环控制器得出交流侧电压给定,经SPWM/SVPWM调制给出驱动信号。

### 3.2 电流/功率内环控制

内环的精确控制直接影响VSI的稳态性能、动态响应速度、电流谐波含量及抗干扰能力等。

电流矢量控制是目前应用在VSI控制中最常见、最广泛的一种控制方式。在控制器选择方面,大体可以分为3大类:1)基于PI控制;2)基于谐振控制技术;3)基于非线性控制器。

由于在电网故障下,负序分量在正向同步坐标系中表现为二倍频分量,但在反向同步坐标系中却表现为直流量,同理,正序分量在反向旋转坐标系中表现为二倍频分量,但在正向同步坐标系中表现为直流量。由于PI控制器可以实现对直流分量的有效控制,因此若采用PI控制器,需要在正负序双旋转 $d-q$ 坐标系下分别对电流的正、负序分量进行控制,进而实现对并网电流的有效控制。该方法不仅需要进行繁琐的坐标变换,而且控制器数量较多,计算量大。针对以上问题,不少学者提出了基于谐振器的控制方法。谐振控制器(R)能对交流电流实现无静差控制,因此PI(P)+R控制器被提出。将谐振控制器的谐振频率设置为二倍电网频率,即可同时对正、负序电流进行控制。此方法避免了繁琐的坐标变换以及电流的正、负序分离过程,在两相静止坐标系中就可以实现对电流的无静差控制。为了进一步提高VSI的控制性能,非线性控制器在电流内环中的应用也成了研究热点<sup>[55-61]</sup>。文献[55]基于电流指令信号中的不稳定极点以及镇定系统的性能,设计了内模控制器,在静止 $\alpha-\beta$ 坐标系中实现了对电流的控制,简化了系统结构,并增强了系统的鲁棒性。无源控制是基于能量观点的全局定义并全局稳定的一种控制方法,也是一种非线性的控制方法,具有很强的鲁棒性。文献[56-57]基于无源控制理论以及VSI的EL(euler lagrange)模型,通过注入阻尼的方法来调节系统的动态响应速度,使实际电流能够快速逼近参考电流,并在保证并网电流正弦化的基础上通过获取开关函数来补偿不平衡的电网电压。文献[58]

采用预测电流控制在 $\alpha-\beta$ 坐标系中实现对电流的控制,该方法的本质是通过控制VSI的输出电压,使得在 $n+1$ 个SVPWM控制周期结束后,即在 $k+2$ 时刻,保证三相并网电流能够无差跟踪上电流参考值。文献[59]提出了基于预测电流控制的无差拍控制,解决了随机采样误差为控制性能所带来的不良影响,提升电流控制性能的同时增强了系统的抗干扰能力。

为了简化控制系统结构,并达到提高系统动态性能的目的,内环也可设置为功率内环,即直接功率控制,该控制方法由于其对系统参数依赖小、便于实现等优点也广泛应用在VSI的控制中。直接功率控制的实质就是通过直接控制功率来间接控制电流的过程。根据定向方式,可分为电网电压定向和虚拟磁链定向。文献[60-61]是分别采用基于传统的电压定向直接功率控制和虚拟磁链定向的直接功率控制,通过引入电网不平衡故障下的功率补偿模块和重构模块来进一步提高系统的故障穿越性能。滞环比较器或PI控制器可作为功率内环的控制器,但是滞环比较器存在开关频率不确定、采样频率高、控制精度较差等问题。此外,滑模控制因具有较强的鲁棒性、较快的动态性能等优点,也被应用在VSI控制中。文献[62]提出了一种基于滑模控制的直接功率控制策略,来实现电流平衡控制或输出有功功率/无功功率无波动的控制目标。以VSI输出有功功率和无功功率的误差构造切换面,为避免不平衡电压对相位检测精度的不良影响,该方案在静止 $\alpha-\beta$ 坐标系中实现。此外,预测控制也可应用于直接功率控制策略中。文献[63]提出了一种基于模型预测的直接功率控制策略,相比于传统的控制策略,该策略在功率参考值的基础上附加了功率的补偿值,进而实现了输出有功功率无波动并减小了并网电流谐波的目标。

## 4 电网畸变不平衡故障下VSI的控制

实际的电网中通常会出现不平衡及谐波污染等情况,将会导致并网输入电流产生谐波畸变。因此在电网畸变不平衡下的VSI控制也备受学者的关注<sup>[12,64-66]</sup>。

电网电压中的谐波主要以5次、7次、11次、13次等低次谐波为主。基于此,文献[41]提出了抑制并网电流低次谐波的控制策略,基于交叉耦合控制策略,采用PI控制器分别控制5次、7次、

11次、13次电流谐波,该方法虽可实现对并网电流谐波的抑制,但是结构复杂,控制器数量较多,不易实现,并且并未考虑如何抑制输出功率波动。文献[65]实现了有功和无功功率的独立解耦控制,以消除电流谐波、保持有功和无功功率恒定为目的,分别在基波同步旋转坐标系、5次同步旋转坐标系、7次同步旋转坐标系下采用多PI控制器实现对电流的无差控制。以上文献所提的控制策略均需在同步旋转 $d-q$ 坐标系中完成,为简化坐标变换的繁琐过程,文献[12]以VSI输出有功功率恒定且电流无畸变为控制目标,在静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下采用比例多重积分控制实现对电流的精准控制。文献[66]在电网畸变不平衡下采用了直接功率控制,以输出功率无波动、并网电流平衡无畸变作为2个独立的控制目标,通过计算得出在电流平衡无畸变情况下的功率补偿值,并在功率内环中采用PIR对功率的波动分量进行有效控制,控制目标得以实现,验证了所提控制策略的正确性。

## 5 结论

本文对电网不平衡故障下VSI的控制进行了分析,主要从正负序分量的分离、控制目标的选取、电流参考值的计算、电流(功率)内环控制、谐波控制等VSI控制关键技术方面进行了综述。分析了电网不平衡故障下VSI控制中值得去研究和探讨的问题,主要归结以下几点,为后续电网不平衡故障下VSI的控制研究工作提供了参考。

1)随着VSI的并网控制功能越来越强大,在电网不平衡故障情况下,风电系统不仅应具备并网规范中要求的不脱网运行,以及向电网提供一定的支撑能力,而且还应具备良好的发电能力,保证良好的并网电能质量。

2)由于电网电压不平衡故障会导致直流母线电压以及输出功率产生二倍频的波动、并网电流会出现畸变,电能质量不能达到IEEE Std.929—2000所规定的THD的标准,因此需要通过合理设计VSI的控制策略来改善这种不平衡电压带来的不良影响。

3)电网电压发生不平衡故障情况下,要成功地实现故障穿越,VSI控制中的过流问题不容忽视,为了防止并网电流过大而烧毁VSI,需要科学地设计限流故障穿越方案,进而实现风电系统的友好并网运行。

4)考虑到风力发电系统的整体性,若只考虑电网故障下VSI的控制,并不能完全确保在风电机组本身安全的同时,向不平衡故障电网提供支撑,因此在后续的工作中,基于系统的整体性,如何实现电网不平衡故障下机侧变流器和网侧变流器的协同控制以实现更为优化的目标是需进一步研究的问题。

## 参考文献

- [1] 张犁,孙凯,冯兰兰,等.一种低漏电流六开关非隔离全桥光伏并网逆变器[J].中国电机工程学报,2012,32(15):1-7.
- [2] 廖勇,庄凯,姚骏.电网电压不平衡时全功率风电并网逆变器的控制策略[J].电网技术,2012,36(1):72-78.
- [3] 刘伟增,周洪伟,张磊,等.电网不平衡条件下光伏并网控制策略研究[J].太阳能学报,2013,34(4):647-652.
- [4] Hu Jiabing, He Yikang. Modeling and Control of Grid-connected Voltage-sourced Converters Under Generalized Unbalanced Operation Conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3):903-913.
- [5] 刘军,赵晨聪.电网电压不平衡时对风电并网逆变器的控制研究[J].电气传动,2016,46(4):50-55.
- [6] 万晓凤,郗瑞霞,胡海林,等.基于果蝇算法的电网不平衡时并网逆变器多目标优化控制研究[J].电网技术,2018,42(5):1628-1635.
- [7] Paap G. Symmetrical Components in the Time Domain and Their Application to Power Network Calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2):522-528.
- [8] Timbus A. Grid Monitoring and Advanced Control of Distributed Power Generation Systems[D]. Denmark: Aalborg University, 2007.
- [9] Ghartemani M K, Iravani M R. A Method for Synchronization of Power Electronic Converters in Polluted and Variable-frequency Environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):1263-1270.
- [10] 徐海亮,章玮,胡家兵,等.电网电压不平衡及谐波畸变时基波电压同步信号的检测[J].电力系统自动化,2012,36(5):90-95.
- [11] Freijeido F, Yepes A, Pez L, et al. Three-phase PLLs with Fast Postfault Retracking and Steady-state Rejection of Voltage Unbalance and Harmonics by Means of Lead Compensation [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2011, 26(1): 85-95.
- [12] 郭小强,郭伟扬,漆汉宏.电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(3):22-28.
- [13] 李云丰,安婷,丁骁,等.电网电压不平衡 MMC-HVDC 无锁相环控制策略[J].高电压技术,2016,42(1):105-111.
- [14] Etxeberria-Otadui I, Viscarret U, Caballero M, et al. New Optimized PWM VSC Control Structures and Strategies Under Unbalanced Voltage Transients[J]. IEEE Transactions on In-

- dustrial Electronics, 2007, 54(5): 2902-2914.
- [15] Zhou Yi, Bauer P, Ferreira J A, *et al.* Operation of Grid-connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 240-246.
- [16] Zhou Peng, He Yikang, Sun Dan, *et al.* Control and Protection of a DFIG-based Wind Turbine Under Unbalanced Grid Voltage Dips[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008: 1-8.
- [17] 王芸, 曹广忠. 基于一种快速变量正负序分离方法的不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1607-1613.
- [18] Rodriguez P, Pou J, Bergas J, *et al.* Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [19] Freijedo FD, Doval-Gandoy J, Lopez O, *et al.* Tuning of Phase-locked Loops for Power Converters Under Distorted Utility Conditions[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2009, 45(6): 2039-2047.
- [20] 章玮, 王宏胜, 任远, 等. 不对称电网电压下三相并网型逆变器的控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 104-110.
- [21] 郭小强, 张学, 卢志刚, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器功率/电流质量协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 346-353.
- [22] Miguel Castilla, Jaime Miret, Jorge Luis Sosa, *et al.* Grid-fault Control Scheme for Three-phase Photovoltaic Inverters with Adjustable Power Quality Characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2930-2940.
- [23] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器多目标协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 148-157.
- [24] Zhang Yongchang, Qu Changqi. Model Predictive Direct Power Control of PWM Rectifiers Under Unbalanced Network Conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4011-4022.
- [25] Zhang Yongchang, Qu Changqi, Li Zhengxi, *et al.* Direct Power Control of PWM Rectifier Under Unbalanced Grid Voltage [C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014: 3199-3204.
- [26] 李建文, 雷亚雄, 李永刚, 等. 并网逆变器电压支撑的参考电流值[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 276-282.
- [27] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89.
- [28] Ehsan Afshari, Gholam Reza Moradi, Ramin Rahimi, *et al.* Control Strategy for Three-phase Grid-connected PV Inverters Enabling Current Limitation Under Unbalanced Faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017, 64(11): 8908-8918.
- [29] Jaime Miret, Miguel Castilla, Antonio Camacho, *et al.* Control Scheme for Photo Voltaic Three-phase Inverters to Minimize Peak Currents During Unbalanced Grid-voltage Sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4262-4271.
- [30] Jiang Weidong, Wang Yongsheng, Wang Jinping, *et al.* Maximizing Instantaneous Active Power Capability for PWM Rectifier Under Unbalanced Grid Voltage Dips Considering the Limitation of Phase Current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7425-7432.
- [31] Guo Xiaoqing, Liu Wenzhao, Lu Zhigang. Flexible Power Regulation and Current-limited Control of the Grid-connected Inverter Under Unbalanced Grid Voltage Faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7425-7432.
- [32] Teodorescu R, Liserre M, and Rodrguez P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [33] Ma K, Chen W, Liserre M, *et al.* Power Controllability of a Three-phase Converter with an Unbalanced AC Source[J]. IEEE Trans. on Power Electron, 2015, 30(3): 1591-1604.
- [34] Rodriguez P, Timbus A V, Teodorescu R, *et al.* Flexible Active Power Control of Distributed Power Generation Systems During Grid Faults[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2007, 54(5): 2583-2592.
- [35] Rodr'iguez P, Timbus A, Teodorescu R, *et al.* Reactive Power Control for Improving Wind Turbine System Behavior Under Grid Faults[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2009, 24(7): 1798-1801.
- [36] Rodriguez P, Medeiros G, Luna A, *et al.* Safe Current Injection Strategies for a STATCOM Under Asymmetrical Grid Faults[C]//IEEE Energy Conversion Congr. And Expo, 2010: 3929-3935.
- [37] Kabiri R, Holmes D G, McGrath B P. Control of Active and Reactive Power Ripple to Mitigate Unbalanced Grid Voltages [J]. IEEE Trans. on Ind. Appl., 2016, 52(5): 1660-1668.
- [38] Yazdani A, Iravani R. A Unified Dynamic Model and Control for the Voltage-sourced Converter Under Unbalanced Grid Conditions[J]. IEEE Trans. on Power Del., 2006, 21(3): 1620-1629.
- [39] Xiao P, Corzine K A, Venayagamoorthy G K. Multiple Reference Frame-based Control of Three-phase PWM Boost Rectifiers Under Unbalanced and Distorted Input Conditions[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2008, 23(4): 2006-2017.
- [40] Liu Y, Li N, Fu Y, *et al.* Stationary-frame-based Generalized Control Diagram for PWM AC-DC Front-end Converters with Unbalanced Grid Voltage in Renewable Energy Systems [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition, 2015: 678-683.
- [41] Ngoc-Bao Lai, Kyeong-Hwa Kim. An Improved Current Control Strategy for a Grid-connected Inverter Under Distorted Grid Conditions[J]. Energies, 2016, 9(3): 190.
- [42] Tafti H D, Maswood A I, Lim Z, *et al.* A Review of Active/Reactive Power Control Strategies for PV Power Plants Under Unbalanced Grid faults[C]//Innovative Smart Grid Technologies-asia, 2015: 1-6.
- [43] Wang F, Duarte J L, Hendrix M A M. Design and Analysis of

- Active Power Control Strategies for Distributed Generation Inverters Under Unbalanced Grid Faults[J]. IET Gener. Transm. Distrib., 2010, 4(8): 905-916.
- [44] Wang F, Duarte J L, Hendrix M. Pliant Active and Reactive Power Control for Grid-interactive Converters Under Unbalanced Voltage Dips[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2011, 26(5): 1511-1521.
- [45] Rodríguez P, Timbus A V, Teodorescu R, *et al.* Independent PQ Control for Distributed Power Generation Systems Under Grid Faults[C]//IECON 2006-32nd Annual Conference on Ind. Electron., 2006: 5185-5190.
- [46] Miret J, Camacho A, Castilla M, *et al.* Control Scheme with Voltage Support Capability for Distributed Generation Inverters Under Voltage Sags[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2013, 28(11): 5252-5262.
- [47] Castilla M, Miret J, Camacho A, *et al.* Voltage Support Control Strategies for Static Synchronous Compensators Under Unbalanced Voltage Sags[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2014, 61(2): 808-820.
- [48] Camacho A, Castilla M, Miret J, *et al.* Reactive Power Control for Distributed Generation Power Plants to Comply with Voltage Limits During Grid Faults[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2014, 29(11): 6224-6234.
- [49] Nejabatkhah F, Li Y, Wu B. Control Strategies of Three-phase Distributed Generation Inverters for Grid Unbalanced[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2016, 31(7): 5228-5241.
- [50] Guo X, Zhang X, Wang B, *et al.* Asymmetrical Grid Fault Ride-through Strategy of Three-phase Grid-connected Inverter Considering Network Impedance Impact in Low-voltage Grid[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2014, 29(3): 1064-1068.
- [51] Rodríguez P, Luna A, Hermoso J R, *et al.* Current Control Method for Distributed Generation Power Generation Plants Under Grid Fault Conditions[C]//IEEE Annu. Conf. on Ind. Electron., 2011: 1262-1269.
- [52] Camacho A, Castilla M, Miret J, *et al.* Active and Reactive Power Strategies with Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters During Unbalanced Grid Faults[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2015, 62(3): 1515-1525.
- [53] Jia J, Yang G, Nielsen A H. A Review on Grid-connected Converter Control for Short Circuit Power Provision under Grid Unbalanced Faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017: 1-13.
- [54] Guo X, Liu W, Zhang X, *et al.* Flexible Control Strategy for Grid-connected Inverter Under Unbalanced Grid Faults Without PLL[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2014, 30(4): 1773-1778.
- [55] 张兴, 季建强, 张崇巍, 等. 基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 52-56.
- [56] 王久和, 杨秀媛. 电网不平衡时电压型 PWM 整流器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 14-20.
- [57] 王久和, 慕小斌. 电网不平衡时电压型 PWM 整流器混合无源控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 159-166.
- [58] 年珩, 於妮飒, 曾嵘. 不平衡电压下并网逆变器的预测电流控制技术[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1123-1129.
- [59] Jiang Weidong, Ma Weicheng, Wang Jinping, *et al.* Deadbeat Control Based on Current Predictive Calibration for Grid-connected Converter Under Unbalanced Grid Voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017, 64(7): 5479-5491.
- [60] Hadian-Amrei S R, Iranmanesh H. Novel Direct Power Control for Compensating Voltage Unbalance and Load Fluctuations in PWM Rectifiers[J]. ACSE Journal, 2006, 6(4): 39-45.
- [61] Hadian Amrei S R, 徐殿国, 郎永强. 一种 PWM 整流器直接功率控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 78-84.
- [62] 全宇, 年珩. 不平衡及谐波电网下并网逆变器的谐振滑模控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1345-1352.
- [63] 张永昌, 曲昌琦. 不平衡电网下脉宽调制整流器模型预测直接功率控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 69-75.
- [64] 姚骏, 夏先锋, 陈西寅, 等. 风电并网用全功率变流器谐波电流抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 17-25.
- [65] 年珩, 全宇. 谐波电网电压下 PWM 整流器增强运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 41-48.
- [66] 沈永波, 年珩. 不平衡及谐波电网下基于静止坐标系的并网逆变器直接功率控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 114-122.

收稿日期: 2018-09-10

修改稿日期: 2018-11-22