

# 并网光伏电站低电压穿越仿真与分析

陈波<sup>1,3</sup>, 朱凌志<sup>2</sup>, 朱晓东<sup>1</sup>

(1. 国网电力科学研究院, 江苏南京 210003; 2. 中国电力科学研究院, 江苏南京 210003;  
3. 福州电业局, 福建福州 350009)

**摘要:**根据光伏电站并网导则要求, 针对光伏电站在电网故障时突然脱网的不利影响, 提出了一种基于光伏逆变器低电压穿越能力的控制策略, 在电网电压跌落时投入该控制策略, 能够限制有功电流的增大, 同时给定无功电流。仿真表明, 在光伏电站并网点电压深跌落和浅跌落情况下, 该控制策略均能够保证光伏逆变器输出电流不过流, 同时能够向电网发出一定的无功功率以支撑并网点电压的恢复, 实现低电压穿越。

**关键词:**光伏电站; 低电压穿越; 电压跌落; 无功输出

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2012)05-0013-05

光伏电站低电压穿越(LVRT)是指当电网故障或扰动引起光伏电站并网点电压波动时, 在一定范围内光伏电站能够不间断并网运行的技术。当光伏电站渗透率较高或出力加大时, 输电网发生故障引起光伏电站跳闸, 容易导致相邻的光伏电站连锁跳闸, 从而引起大面积停电, 影响电网安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。因此要求光伏电站具有LVRT的能力。随着世界范围内光伏电站容量的不断扩大, 大型光伏电站接入地区电网将会对电网安全稳定产生很大影响, 其中一个重要影响就是在电网故障时光伏电站的突然脱网会对电网正常运行产生严重的不良影响<sup>[3-4]</sup>。2010年12月, 我国首套用于光伏电站LVRT现场测试的检测平台在国网电力科学研究院建成<sup>[5]</sup>, 表明我国重视光伏电站LVRT能力的研究与检测工作。

然而, 目前国内外的光伏电站几乎不具有LVRT的能力, 对光伏电站LVRT关键技术的研究也几乎是空白。在新能源并网的LVRT方面, 风电场的LVRT可为光伏电站LVRT技术提供借鉴。文献[6-7]主要分析了目前光伏电站实现LVRT的重要性和必要性。光伏电站同风电场相比, 都是通过电力电子器件并网, 电力电子器件的耐受能力制约电站的LVRT能力; 不同的是光伏电站没有转动惯量, 且根据光伏组件的输出特性, 直流侧的电压在电网故障时不会升高很多, 因此制约光伏电站LVRT的瓶颈是逆变器交流侧输出电流的大小, 若超过额定电流过大, 则会损害电力电子器件。因此文中提出了一种基于光伏逆变器的光伏电站LVRT技术, 在电网故障时能保持并网, 并向电网输出一定的无功功率以支撑并网点电压恢复, 减少了因光伏电站的突然脱网给电网带来的不利影响。

## 1 光伏电站 LVRT 技术研究背景

2011年国家电网公司出台的《光伏电站接入电网技术规定》(企标)明确指出<sup>[8]</sup>:“大中型光伏电站应具备一定的LVRT能力; 电力系统发生不同类型故障时, 若光伏电站并网点考核电压全部在图中电压轮廓线及以上的区域时, 光伏电站应保证不间断并网运行; 否则光伏电站停止向电网线路送电。”光伏电站的LVRT能力需要由逆变器实现。LVRT能力要求如图1所示, 一般选择 $U_{L1}$ 设定为0.2倍额定电压。

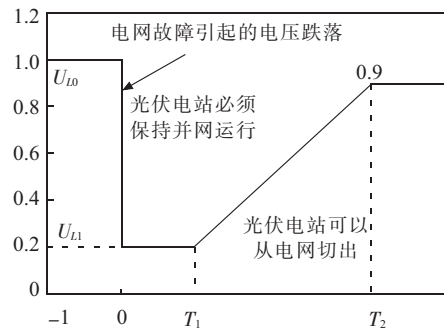
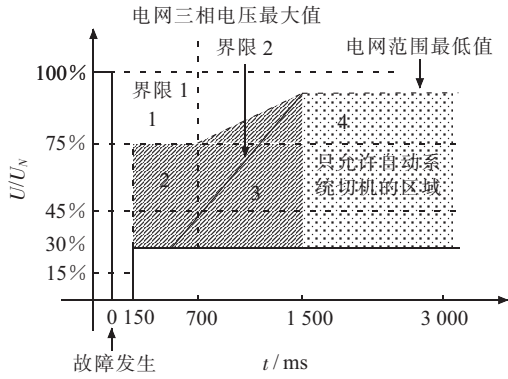


图1 大中型光伏电站的LVRT能力要求

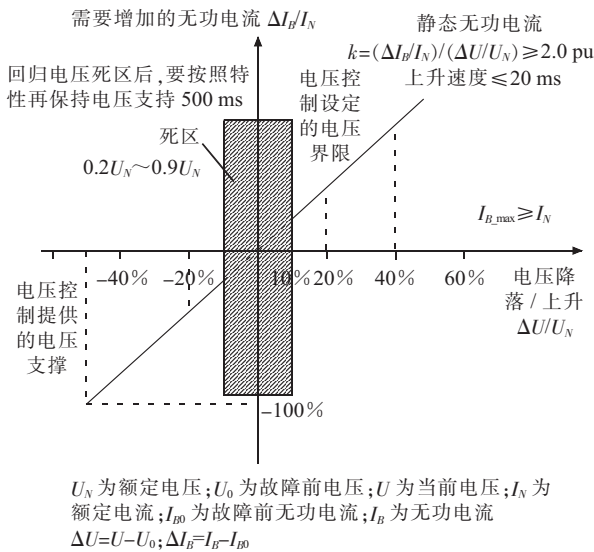
德国关于分布式电压接入电网时的低电压穿越要求如图2所示<sup>[9]</sup>。在电压跌落到0时, 分布式电源至少要坚持150ms不脱网。在区域3可以脱网运行, 当然能并网运行也是可以的。电压必须在故障后1500ms内恢复到90%以上。其关于无功电流和电压跌落的关系如图3所示。

可见电压降落期间, 光伏电站必须提高其无功电流以支持电网电压, 当电压跌落超过10%时, 每1%的电压跌落, 光伏电站至少需要提供2%的无功电流, 其响应速度应该在20ms以内, 必要时可以提供100%的无功电流。



- 1 区为不脱离电网穿越故障;
- 2 区为在短时中断情况下,不脱离电网穿越故障;
- 3 区为允许短时中断;
- 4 区为允许切机

图2 德国对分布式电源接入电网时LVRT的要求



$U_N$  为额定电压;  $U_0$  为故障前电压;  $U$  为当前电压;  $I_N$  为额定电流;  $I_{B0}$  为故障前无功电流;  $I_B$  为无功电流  
 $\Delta U=U-U_0$ ;  $\Delta I_B=I_B-I_{B0}$

图3 德国关于无功电压支撑的规定

## 2 光伏电站 LVRT 控制策略

光伏电站 LVRT 控制技术的核心是光伏逆变器,不需要额外增加硬件设备,通过改变光伏逆变器的控制策略就可以实现。

### 2.1 光伏逆变器模型及其控制策略

光伏阵列输出的直流电能通过三相六桥逆变器转变为所需的三相电能。其控制目标是输出稳定、高质量的正弦波电流,且与并网点电压同频、功率因数满足要求,因此需要对逆变桥进行精确的控制。图4为三相并网逆变器  $U_{dc}$ - $Q$  并网控制框图<sup>[10]</sup>。

逆变器通过最大功率点跟踪(MPPT)算法得到  $U_{dc\_ref}$ ,该参考值与直流侧电压之间的误差信号经过PI调节得到内环的电流  $d$  轴分量参考值,有功电流的参考值  $i_d^*$  与逆变器出口电流  $d$  轴分量之间的误差信号经过电流环PI调节、 $dq$  解耦过程后得到逆变器脉冲宽度调制(PWM)调制波  $U_d$ ;同理控制无

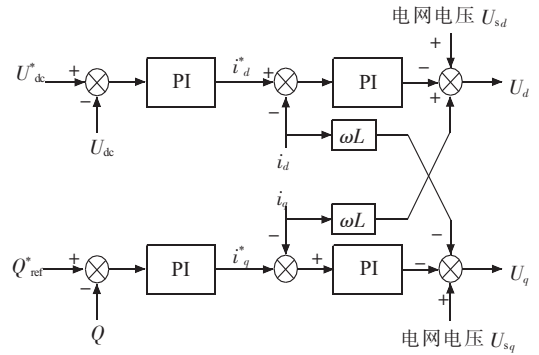


图4 逆变器  $U_{dc}$ - $Q$  并网控制框图

功率。

### 2.2 LVRT 有功电流控制策略

制约光伏电站 LVRT 能力的主要是光伏逆变器出口处的电流,不应过流而导致光伏逆变器跳开,所以既要保持逆变器不脱网,又不能损坏逆变器。由于电压跌落期间逆变器输出的电流主要是有功分量  $i_d$ ,因此使输出电流不过流(一般不超过额定电流的1.1倍)主要是控制电流内环的有功电流给定值  $i_d^*$  (见图4)。其控制策略如图5所示。

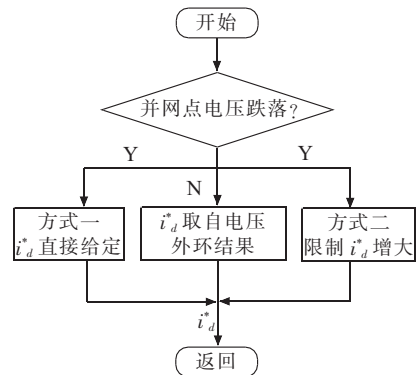


图5 控制策略流程

图中,控制器检测并网点电压是否跌落,若电压跌落,则直接给定输出不过流时的  $i_d^*$  值作为参考值(可用正常运行时的  $i_d^*$  值作为参考值);若电压没有跌落,则  $i_d^*$  继续用电压外环计算出的结果进行计算。另一种方法是用逆变器正常运行时的  $i_d^*$  值作为限制值,通过限幅环节限制  $i_d^*$  的增大,从而限制  $i_d$  的增加。

新的并网要求还规定,在电网故障期间,光伏电站不仅需要保持并网状态,而且最好能够动态发出无功功率,支撑电网电压,并尽快恢复电气有功出力。正常情况时逆变器运行在单位功率因数,  $i_d=i_q=1$  pu,逆变器输出电流  $i$  在电网电压跌落时不能超过额定电流的1.1倍,  $i_d$  以1pu作为限制,则最大无功电流给定有:

$$i_q^* = \sqrt{(1.1i)^2 - i_d^2} = 0.46i \quad (1)$$

即最大的无功电流给定不能超过额定电流的

46%。否则会造成交流侧输出电流过流。如要进一步增大无功电流给定,则必须减小有功电流给定值。

### 2.3 有功电流和无功电流的协调策略

设  $U$  为光伏并网点电压 ( $0.2 \leq U \leq 0.9$  pu), 逆变器输出的额定电流为  $i_N$ , 有功电流和无功电流分别为  $i_d$  和  $i_q$ 。根据并网准则对电压跌落与无功电流关系的要求, 设光伏电站在电压跌落到 90% 以下时, 电压每跌落 1%, 至少提供  $x\%$  无功电流。即无功电流为:

$$i_q \geq x(0.9-U)i_N \quad (2)$$

根据网侧电流不能超过额定电流的 1.1 倍的规定, 则有:  $i_d^2 + i_q^2 \leq (1.1i_N)^2$ , 即:

$$i_d^2 + [x(0.9-U)i_N]^2 \leq (1.1i_N)^2 \quad (3)$$

因此有:

$$i_d^2 \leq (1.1i_N)^2 - x^2(0.9-U)^2 i_N^2 = [1.21 - x^2(0.9-U)^2] i_N^2 \quad (4)$$

设  $A = [1.21 - x^2(0.9-U)^2] i_N^2$ , 又由于  $x > 0, 0.2 \leq U \leq 0.9$ , 因此有:

$$(1.21 - 0.7^2 x^2) i_N^2 \leq A \leq 1.21 i_N^2 \quad (5)$$

把式(5)代入式(4), 可得:

$$0 \leq i_d^2 \leq (1.21 - 0.7^2 x^2) i_N^2 \quad (6)$$

即  $(1.21 - 0.7^2 x^2) i_N^2 \geq 0, i_N^2 \geq 0$ , 因此:

$$x \leq \sqrt{1.21/0.49} = 1.571 \quad (7)$$

即 1% 的电压跌落时, 最大允许提供 1.571% 的无功电流, 此时  $i_d = 0$ 。

若  $i_d = 1$ , 则  $1 \leq 1.21 - 0.7^2 x^2, x \leq 0.655$ 。即  $i_d = 1$  (不降低  $i_d$  时) 时, 最大允许提供 0.655% 的无功电流。若要多提供无功电流, 就要减少  $i_d$ 。

当逆变器额定运行时, 可以发出的无功电流最大为  $i_q = \sqrt{1.1^2 - 1^2} = 0.46$  pu, 若规定每 1% 的电压跌落提供 1.5% 的无功电流, 在不降低  $i_d$  的情况下, 最大可以允许跌落的程度为  $(0.9 - 0.46/1.5) \approx 0.593$  pu, 即跌落到 59.3% 以下时, 若要满足并网要求, 就必须降低有功电流的输出  $i_d$ 。跌落程度在 59.3% 以上时, 可以不降低有功电流输出, 输出电流的 1.1 倍裕度可以保证其满足并网要求。当电压跌落程度越大时, 需要提供的无功电流就越多, 则有功电流需要降低程度就越大。有功电流降低的程度为(降低至):

$$i_d = \sqrt{1.1^2 - [(0.9-U) \times 1.5]^2} \quad (8)$$

若光伏逆变器不是满功率运行时, 即正常运行时  $0 \leq i_d \leq 1$ 。  $i_d$  若较小时, 本身已经有足够裕量用于

无功电流的发送, 此时不需要降低  $i_d$ 。

### 3 算例仿真

文中采用 PSCAD/EMTDC 平台对光伏电站 LVRT 的可行性与正确性进行验证。算例如图 6 所示。10 MW 光伏电站, 每个等值发电单元容量为 5 MW, 光伏逆变器出口为 400 V 母线, 经过升压变压器升高到 35 kV, 经过一定距离的线路与大电网相连。正常运行时光伏电站功率因数为 1。

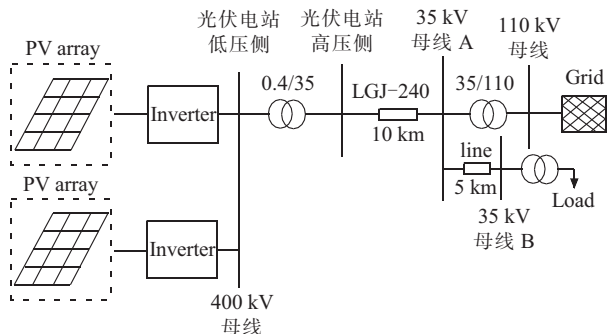


图 6 仿真算例

#### 3.1 并网点电压深跌落至 20%

假设图 6 中线路 line 在 0.5 s 时发生三相短路故障, 故障持续 1.2 s, 并网点电压跌落至额定值的 20% 左右。故障期间并网点电压和电流情况如图 7 所示。选择电网到光伏电站方向为电流正方向。

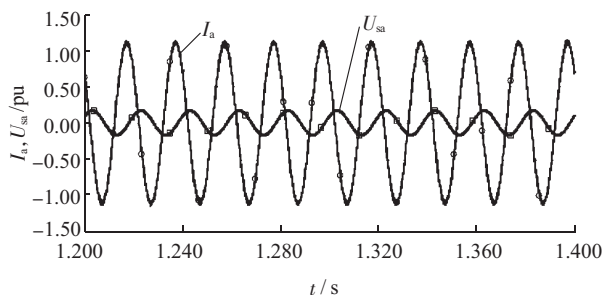


图 7 并网点电压和电流波形

由图可见, 在低电压期间光伏电站的输出电流增大到额定电流的约 1.1 倍, 由于已限制住了有功电流, 因此电流增大的部分主要是无功电流。

低电压期间光伏电站直流侧电压会略有增大, 直流侧电流减小, 因此输入逆变器的功率减小, 不会有过多的电能积累在直流侧电容上。光伏电站有无提供无功功率时并网点电压的对比如图 8 所示。

可见由于逆变器对电网提供了无功功率, 对电网的电压起到了一定的支撑作用, 能将跌落的电压从 0.2 pu 提升到约 0.25 pu。但总体来说, 光伏电站无功控制对并网点电压的支撑作用不算很大, 这是光伏电站的渗透率较低缘故。图 9 和 10 分别为光伏电站输出的有功、无功电流和有功、无功功率。

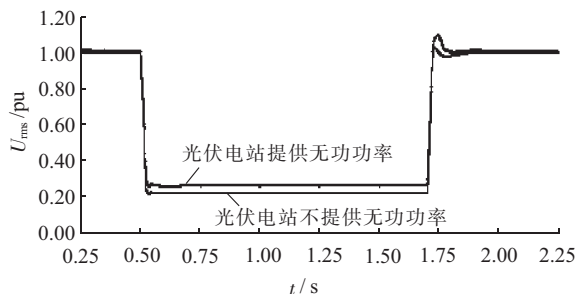


图8 光伏电站有无无功控制时的并网点电压比较

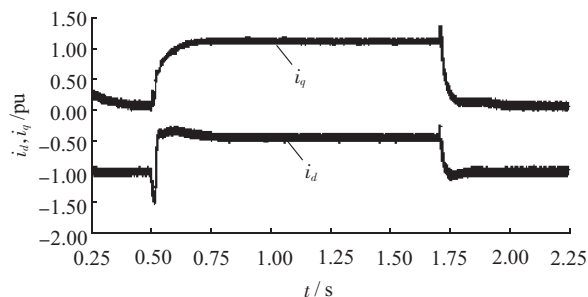


图9 光伏电站输出有功电流和无功电流

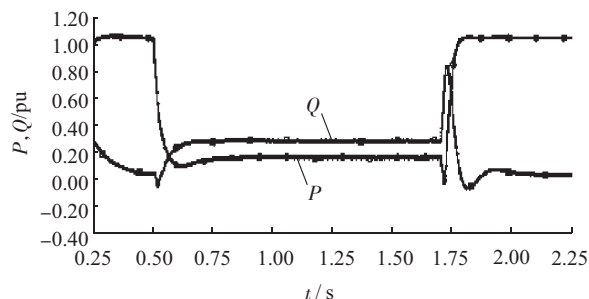


图10 光伏电站输出有功功率和无功功率

由于逆变器进行无功控制,网侧电压跌落到25%时需要提供的无功电流为  $1.5 \times (0.9 - 0.25) = 0.975$  pu。此时受到逆变器容量的限制,必须降低有功电流。此时有功电流为  $\sqrt{1.1^2 - 0.975^2} = 0.509$  pu,总输出电流为 1.1 pu。理论计算与仿真结果一致。有功电流降低,无功电流增大,因此可知总电流增大的部分是无功电流。

此时有功电流输出为 0.509 pu,无功电流输出为 0.975 pu,则有功功率和无功功率分别为  $0.509 \times 0.25 = 0.127$  pu,  $0.975 \times 0.25 = 0.244$  pu。由图可见理论计算与仿真结果一致。

### 3.2 并网点电压浅跌落至 80%

假设图 6 中线路 line 在 0.5 s 时发生三相短路故障,故障持续 1.2 s,并网点电压跌落至额定值的 80% 左右。故障期间并网点电压和电流情况如图 11 所示。仍选择电网到光伏电站方向为电流正方向。

由图可见,由于并网点电压跌落程度很小,因此光伏电站输出电流在故障期间几乎没有增大。

光伏电站有无提供无功功率时并网点电压的对比如图 12 所示。

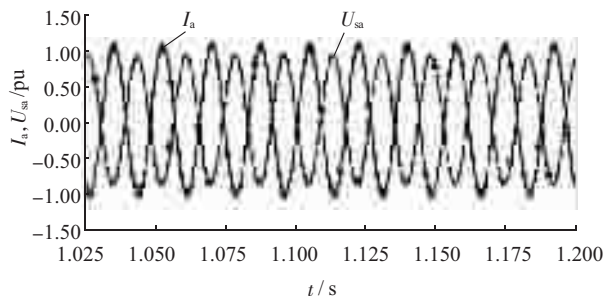


图11 并网点电压和电流波形

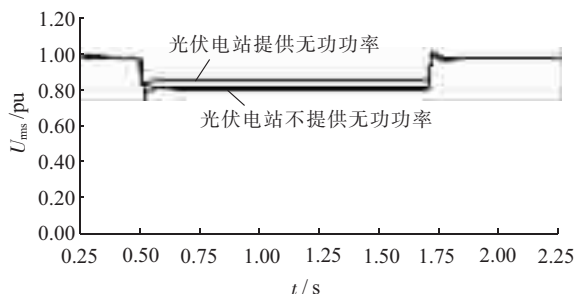


图12 光伏电站有无无功控制时的并网点电压比较

由于逆变器对电网提供了无功功率,对电网的电压起到了一定的支撑作用,能将跌落的电压从 0.8 pu 提升到约 0.86 pu。

综上所述,并网点电压由于故障而导致的深跌落和浅跌落情况下,光伏电站采用控制策略之后均能实现 LVRT,保持并网运行并使逆变器交流侧输出不过流。

## 4 结束语

文中提出了一种光伏电站 LVRT 控制策略,能够在并网点电压深跌落和浅跌落时保持光伏电站并网运行,同时交流侧电流不过流,不损害光伏逆变器,还可以在电网故障期间向电网提供无功功率以支撑局部电网电压,并通过仿真结果验证了控制策略的有效性。

### 参考文献:

- [1] MORREN J, DE HAAN S W H. Ride through of Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generator during a Voltage Dip [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 435-441.
- [2] 甄晓亚,尹忠东,王云飞,等. 太阳能发电低电压穿越技术综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 65-68.
- [3] VARMA R K, SALAMA M, SEETHAPATHY R, et al. Large-scale Photovoltaic Solar Power Integration in Transmission and Distribution Networks[C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting 2009, 2009.
- [4] 雷一,赵争鸣. 大容量光伏发电关键技术与并网影响综述[J]. 电力电子, 2010(3): 16-22.
- [5] 李红涛,张军军,包斯嘉,等. 小型并网光伏电站移动检测平台设计与开发[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 39-42.

- [6] 王利平,杨德洲,张军.大型光伏发电系统控制原理与并网特性研究[J].电力电子技术,2010,44(6):61-63.
- [7] 党锁刚,高富春,汉鹏武,等.太阳能发电技术特性研究[J].华电技术,2010,32(6):76-80.
- [8] 国家电网公司.光伏电站接入电网技术规定 [N].2011.
- [9] MARINOPOULOS A, PAPANDEA F, REZA M, et al. Grid Integration Aspects of Large Solar PV Installations: LVRT Capability and Reactive Power/Voltage Support Requirements [C]. Power Technology 2011 IEEE Trondheim, 2011.
- [10] 程军照,李澍森,张腾飞.多路并网光伏发电系统的仿真与分析[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(4):58-62.

作者简介:

陈波(1986),男,福建福州人,硕士,从事光伏电站并网控制技术研究工作;

朱凌志(1975),男,博士,高级工程师,从事风力发电、光伏发电系统接入与控制方法研究工作;

朱晓东(1970),男,研究员级高级工程师,从事新能源发电、励磁系统控制等研究工作。

## The Simulation and Analysis on Low Voltage Ride Through of Grid-connected Photovoltaic Power Station

CHEN Bo<sup>1,3</sup>, ZHU Ling-zhi<sup>2</sup>, ZHU Xiao-dong<sup>1</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. China Electric Power Research Institut, Nanjing 210003, China;

3. Fuzhou Electric Power Industry Bureau, Fuzhou 350009, China)

**Abstract:** Based on the guide requirements of grid-connected photovoltaic power station, a control strategy based on low voltage ride through capability of the PV inverter is proposed for the adverse effects caused by photovoltaic power station off the grid when power failure taking place. The increase of active current can be limited, and the reactive current can be given through putting into the control strategy when the power grid voltage drops. Simulation results show that in the case of network voltage dropping deeply and shallowly at the grid-connected point of photovoltaic power station, the control strategy can ensure that the PV inverter output current flow doesn't overcurrent. At the same time, a certain amount of reactive power can be sent out to the grid to support the recovery of voltage at the grid-connected point and achieve low voltage ride through.

**Key words:** photovoltaic power station; low voltage ride through; voltage drop; reactive power output

### 下 期 要 目

- 高压直流输电系统双调谐直流滤波器设计
- 一起 10 kV 线路单相断线故障分析
- 数字化变电站中电能计量装置的检验
- 大规模风电接入的输电网规划研究评述
- PI 实时数据库在大机组供热在线监测系统中的应用
- “六统一”设计下的双母线方式断路器失灵保护运行分析
- 一起备自投拒动事故的分析及解决方案
- 双馈风机改善电力系统阻尼特性的研究
- 高压直流换流变一次通流试验方法的研究及应用

### 广 告 索 引

江苏华电戚墅堰发电有限公司	封面	《江苏电机工程》协办单位	前插 4
远东电缆有限公司	封二	宿迁电力设计院有限公司	(黑白) 文前 1
南京南瑞继保电气有限公司	前插 1	南京远能电力工程有限公司	封三
《江苏电机工程》协办单位	前插 2、3	南京南瑞集团有限公司信息通信技术分公司	封底