

基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究

刘耀远¹, 曾成碧¹, 李庭敏², 付文雯¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司凉山供电公司, 四川 西昌 615050)

摘要: 针对光伏系统在电网扰动或故障时突然脱网给电网带来严重后果, 对基于超级电容的光伏并网系统的低电压穿越控制策略进行研究。在电网电压跌落时, 通过控制超级电容吸收有功功率, 平衡直流母线电压, 减少光伏阵列注入逆变器的功率, 防止逆变器过流。同时保证了逆变器的无功电流输出能力, 支撑电网电压, 实现系统的低电压穿越。利用系统仿真模型进行验证, 结果表明该方法提高了光伏并网的低电压穿越能力, 在保证光伏系统安全运行的同时, 大大提高了无功支撑能力, 稳定了电网电压, 利于故障恢复。

关键词: 光伏系统; 两级式并网; 低电压穿越; 超级电容; 无功支撑

Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super-capacitor

LIU Yao-yuan¹, ZENG Cheng-bi¹, LI Ting-min², FU Wen-wen¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Liangshan Power Supply Company, Sichuan Electric Power Company, Xichang 615050, China)

Abstract: To avoid serious consequences caused by photovoltaic system suddenly loss connection from the power grid when power grid disturbances or malfunctions happened, this paper researches LVRT control strategy of super-capacitor-based photovoltaic systems. When the grid voltage drops, the super capacitor is used to absorb the active power, balance DC bus voltage, and reduce the power injected into the inverter to prevent the inverter overcurrent. Simulation results show that this method greatly improves the photovoltaic system's low voltage ride through capability, ensures the safe operation of the PV inverter, meanwhile provides reactive power support to stabilize voltage of power grid, and is conducive to failure recovery.

Key words: PV systems; double-stage grid-connected; LVRT; super-capacitor; reactive power support

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)13-0077-06

0 引言

当前光伏发电已成为继风力发电之后新能源利用的又一重要趋势。随着光伏系统的大量并网, 光伏并网的低电压穿越技术作为电网故障恢复的有力支撑, 也受到越来越多的关注。

相较于风力发电, 目前国内外针对光伏的LVRT标准和研究还较落后。中国关于光伏的LVRT要求如, 国家电网公司在2011年颁布的《光伏电站接入电网技术规定》, 规定大中型光伏电站应该在电网故障期间保持一定时间不脱网, 实现低电压穿越以减小对电网的影响。图1表示了光伏电站的LVRT能力一般要求, 逆变器并网点电压在黑色实线及以

上的区域能够不脱网运行, 德国的电网标准中还提出了光伏电站在电压跌落时能够及时提供无功功率支撑的要求。随着光伏发电渗透率的进一步提高, 这种能力对保证电网的安全稳定运行有着越发重要的意义^[1-3]。

目前, 已有部分针对光伏逆变器的低电压穿越技术研究^[4-5], 但这些方法很难同时保证输出的电能质量和直流母线电压的稳定。光伏发电主要用于提供有功功率, 运行状态接近单位功率因数, 但实际上通过对光伏逆变器的PQ解耦控制, 同样可以实现常规的有源无功补偿, 文献[6]证实了两级式光伏发电系统具有无功调节能力。文献[7-8]提出利用并网逆变器进行可控的无功功率调节支撑并网点电压实现故障期间的低电压穿越。风电系统中已经有了利用超级电容等储能装置进行功率控制, 快速吸收跌落期间过剩的有功功率, 实现故障期间逆变器不

基金项目: 四川省科技支撑项目(2014GZ0069); 四川省教育厅自然科学基金项目(13ZA0096)

过流的研究成果^[9-10]。

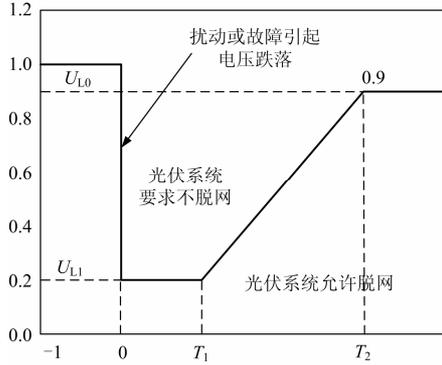


图 1 光伏电站的低电压穿越能力一般要求

Fig. 1 General requirement of low voltage ride through capability for photovoltaic power plants

本文提出光伏并网系统中超级电容有功调节和逆变器无功调节相协调的功率控制策略来实现低电压穿越，利用直流侧超级电容平衡故障期间有功功率，保证直流母线电压稳定，防止逆变器过流，利用光伏逆变器本身的无功输出能力进行无功补偿，支撑电网电压。在不改变光伏最大功率跟踪运行模式下实现了故障期间光伏系统的可靠运行。

1 光伏并网系统结构与仿真模型

1.1 系统结构

光伏阵列采用两级式并网前级 Boost 升压电路实现光伏电池的最大功率跟踪，后级 DC-AC 逆变器通过 PQ 控制实现交流并网，超级电容储能装置通过双向 DC-DC 接直流母线。主要电路拓扑结构如图 2 所示。

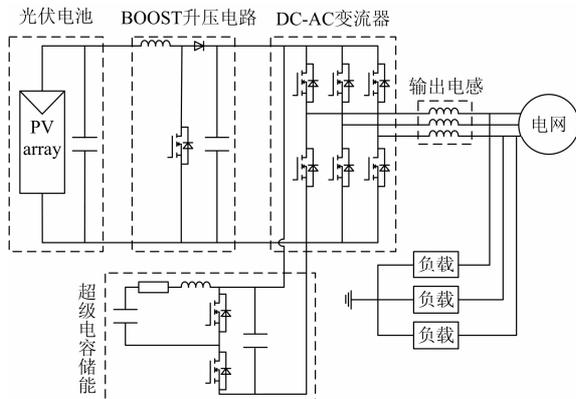


图 2 光伏并网系统结构

Fig. 2 Structure of PV grid-connected system

两级式并网结构在前级和后级变换器之间设置有一个足够大的直流滤波电容，该直流滤波电容在缓冲前、后级能量变化的同时起到将前、后级解耦

控制的作用。储能系统结构利用双向 DC-DC 功率变换器对超级电容进行充放电控制。

1.2 系统模型

1.2.1 光伏电池模型

根据 Shockley 的扩散理论及电路原理相关知识可以得到光伏电池的输出表达式如式 (1) ^[11-12]。

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中： I_{ph} 为光生电流； I_d 为二极管结电流； R_s 为光伏电池串联等效电阻； R_{sh} 为光伏电池并联等效电阻； I_0 为反向饱和电流，电子电荷 $q=1.6 \times 10^{-19}C$ ； n 为二极管因子；波尔兹曼常数 $k=1.38 \times 10^{-23}J/K$ ； T 为绝对温度。式 (1) 是光伏电池根据光生伏打原理推导出来的最基本表达式，是光伏电池理论分析的基础。但式中的参数 I_0 、 I_{ph} 、 R_{sh} 、 R_s 、 n 确定起来相当困难。因而在保证一定精确度的前提下，我们提出光伏电池工程用表达式如式 (2)。

$$I = I_{sh} - C_1 I_{sh} \left\{ \exp \left[\frac{(V)}{C_2 V_{oc}} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

其中 C_1 、 C_2 值由式 (3) 确定

$$\begin{cases} C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}}) \\ C_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) [\ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

1.2.2 超级电容模型 (图 3)

超级电容利用活性炭多孔电极和电解质组成的双电层结构使得其容量较之传统电容有了巨大的提升。超级电容具有容量大、功率密度高、大电流充放电能力强、能量转换效率高、循环使用寿命长和对环境无污染等优点。因而在光伏低电压穿越的暂态过程中，利用超级电容来吸收短时较大的不平衡功率具有其他储能装置不具备的优势。

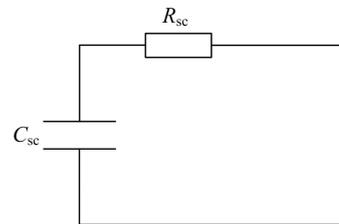


图 3 超级电容简化模型

Fig. 3 Super capacitor simplified model

考虑到电力系统中，电压跌落故障的持续时间很短 ($\leq 1s$)，采用由一个 R_{sc} 和 C_{sc} 构成的最简化超级电容模型，其中 R_{sc} 表示等效串联电阻，就能够

模拟超级电容秒级充电特性^[10]。

2 光伏并网系统控制策略

2.1 前级 DC-DC Boost 升压电路控制

逆变器前级 DC-DC 变化单元主要实现最大功率跟踪控制, 光伏电池的输出存在一个最大功率点, 当远离最大功率点时输出功率会极低。而在不同的光照和温度条件下光伏电池具有不同的最大功率点, 因而光伏发电系统的正常运行应建立在最大功率跟踪能力的基础上。

本文采用前级 Boost 电路改变升压比对光伏电池工作电压进行调节, 利用目前被广泛研究和采用的扰动观察法思想^[13]跟踪光伏最大功率点。

2.2 后级 DC-AC 变换器控制策略

后级交流变换器的控制作用主要包括: 稳定前后级间的直流母线电压, 即能实现光伏电池发出功率、送入电网功率和储能设备功率三者之间的功率流向的平衡; 实现系统输出电流的控制, 优化波形品质和相位特性, 正常情况下使输出电流跟踪电网电压, 实现单位功率因数运行, 特殊情况下如低电压穿越时, 能根据指令进行无功功率的输出。

DC-AC 变换器采用基于瞬时无功理论的 PQ 控制得到交流参考电压, 利用 SVPWM 空间矢量调制技术得到控制开关管的波形。交流参考电压 u_d 、 u_q 控制方程可以表示为

$$\begin{cases} u_d = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_d^* - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ u_q = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_p 、 k_i 为电流内环的比例和积分系数; i_d^* 、 i_q^* 为 d、q 坐标系下的电流给定值。

图 4 所示的框图, i_d 和 i_q 分别与有功 (P) 和无功功率 (Q) 呈比例关系, 体现了 PQ 控制的思想, i_d 参考值通过直流母线电容电压值与给定参考值作差后经 PI 环节得到, i_q 参考值根据逆变器运行状态给定。当发生电压跌落时, 可以根据电压跌落幅度确定系统输出无功功率大小 Q^* 。

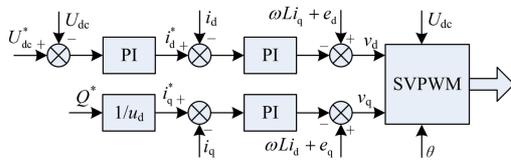


图 4 DC-AC 逆变器的 PQ 控制框图

Fig. 4 PQ control block diagram of DC-AC converter

2.3 超级电容器充放电控制

超级电容器组通过 BDC(Bi-direction DC-DC

Converter) 并联接到直流母线电容上, 对超级电容器充放电的控制就是对 BDC 的控制。其拓扑结构如图 5 所示。

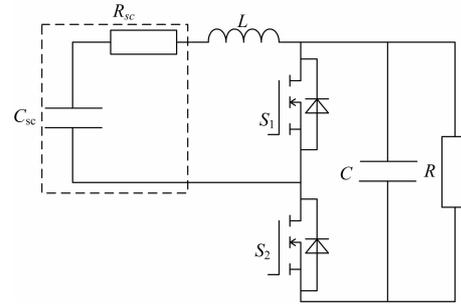


图 5 超级电容储能装置

Fig. 5 Super capacitor energy storage device

图 6 所示, 控制采用了电压电流双闭环, 满足多种充放电控制要求。双环同时工作时实现恒压充电, 控制超级电容充电电压的上下限, 如当超级电容一段时间不带电运行, 自身由于漏电阻作用而使得端电压降低于工作电压下限时进行浮冲充电。电流单环作用, 实现恒功率充电。工作时必须考虑超级电容器端电压以及功率限值的要求, 限制给定电流幅值。

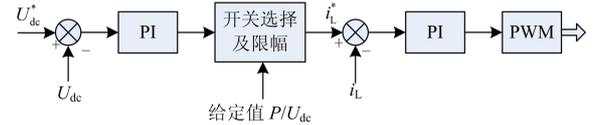


图 6 超级电容充放电控制

Fig. 6 Super capacitor charge and discharge control

2.4 LVRT 功能的综合控制策略

本文提出的光伏低电压穿越控制策略, 利用超级电容吸收故障期间的不平衡功率, 限制逆变器的有功输出, 实现不过流安全并网; 保证系统的无功输出裕量, 利用 PQ 控制发出无功功率, 稳定电压帮助故障恢复。

光伏系统的无功输出能力受逆变器的电流耐受能力制约, 一般情况下, 逆变器允许的短时过流为 1.1 倍, 在能够补偿电压的跌落时, 逆变器输出无功功率极限为

$$Q^{\max} \leq \sqrt{(1.1S)^2 - P^2} \quad (5)$$

S 为额定视在功率, 当 P 为 1 p.u. 时, $Q^{\max} \leq 0.46$ p.u., 即能够提供的无功补偿能力是很有限的, 但利用超级电容储能吸收故障期间的有功功率, P 可以取到小于 1 的值时, 无功补偿量可以大大提高。在完全吸收来自光伏电池的功率时有并网功率 $P=0$, 此时 $Q^{\max} \leq 1.1$ p.u., 电压跌落期间超级电容吸收或

输出的有功功率为

$$\begin{cases} P_{SC} = P_{PV} - P_{grid} \\ P_{grid}^2 + Q_{grid}^2 = S_{grid} \end{cases} \quad (6)$$

根据故障情况和电压跌落程度，结合运行经验确定无功补偿值 Q_{grid} ，根据式 (6) 可以快速计算出超级电容满足光伏逆变器不过载的最低充电功率 P_{sc} ，利用该参考值及一些裕量，确定所需的单电流环充电功率值。

3 系统仿真验证及分析

3.1 仿真参数

利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型，光伏系统接入 380 V 配电网。仿真参数，光照 $S=1000 \text{ W/m}^2$ ，温度 $T=25^\circ\text{C}$ 。光伏电池 $U_m=350 \text{ V}$ ， $I_m=200 \text{ A}$ ， $T_{ref}=25^\circ\text{C}$ ， $S_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$ ， $R_s=2 \Omega$ ， $U_{oc}=370 \text{ V}$ ， $I_{sc}=213 \text{ A}$ ， $a=0.015$ ， $b=0.7$ 。Boost 电路参数电容 $C=50 \mu\text{f}$ ，电感 $L=10 \text{ mh}$ 。直流母线电容 $C=10 \text{ mf}$ ，双向 DC-DC 电感 $L=2 \text{ mh}$ ，超级电容器组 $C_{sc}=20 \text{ f}$ ， $R_{sc}=0.01 \Omega$ 工作电压 100 V 到 250 V，功率器件采用开关频率 20 kHz 的 IGBT。

控制器参数，Boost 升压电路占空比调制信号每次扰动 0.1%。DC-AC 变流器 PI 参数：电压外环 $K_p=5$ ， $K_i=500$ ，电流内环 $K_p(i_d)=K_p(i_q)=10$ ， $K_i(i_d)=K_i(i_q)=3$ 。双向 DC-DC PI 参数电压外环 $K_p=2$ ， $K_i=10$ ，电流内环 $K_p=0.1$ ， $K_i=2$ 。

3.2 仿真结果及分析

仿真验证所提出并网系统的 LVRT 能力。并网点电压在 0.15 s 时发生跌落，持续时间 200 ms 后电压恢复。如图 7 电压跌落时不附加任何控制，逆变器运行在单位功率因数，不发出无功，有功输出不变，在电压跌落期间并网电流急剧增大，导致逆变器脱网。

加入 LVRT 控制策略，图 8 给出直流母线电压，

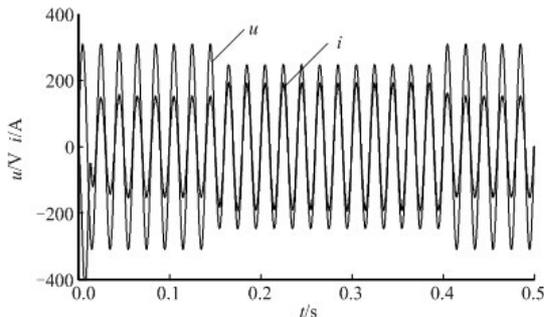


图 7 不附加任何控制时并网电压电流波形(a相)
Fig. 7 Grid voltage and current waveforms without control strategy (phase a)

稳定维持在 800 V，动态响应理想。考察 a 相的情况，通过与不加入超级电容储能的情形对比（图中虚线为不加入超级电容有功控制策略），验证超级电容对 LVRT 能力的提高。由图 9(a)、图 9(b)可见在电压跌落时利用超级电容迅速进行功率的调节，可以有效地减小并网电流，保证逆变器的不过流。由图 9(c)、图 9 (d)可以看出该策略较好地实现了低电压穿越期间的光伏系统无功输出能力，通过超级电容在故障期间吸收有功，可以降低功率因数。减小了有功电流，为逆变器发出更多无功电流留出裕量，大大提升了光伏系统的无功电压支撑能力。

当并网点电压跌落程度加深时，在超级电容功率允许的情况下可以进一步吸收来自光伏电池的功率，使逆变器发出大部分无功运行在低功率因数的状态为电网提供更多无功支撑。如图 10 电压跌落 0.7 p.u.，跌落期间光伏逆变器功率因数低于 0.5，可以为电网提供充足的无功支撑。

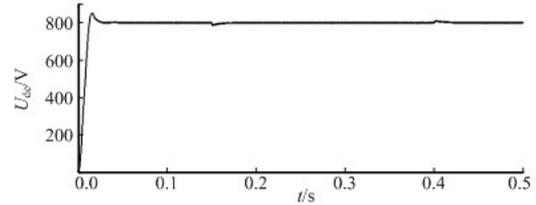
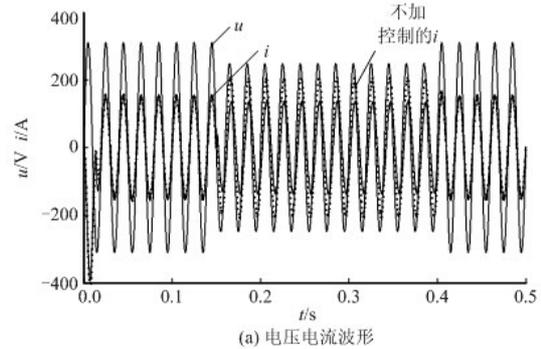
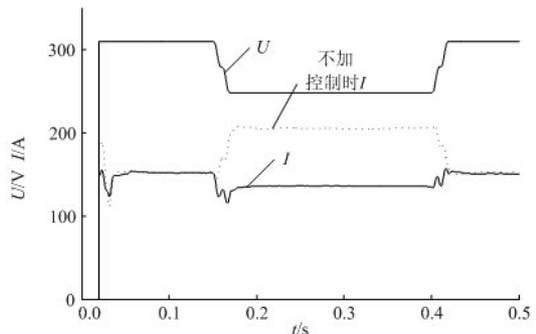


图 8 电压跌落 0.2 p.u.直流母线电压
Fig. 8 DC bus voltage when voltage sag 0.2p.u.



(a) 电压电流波形



(b) 电压电流幅值

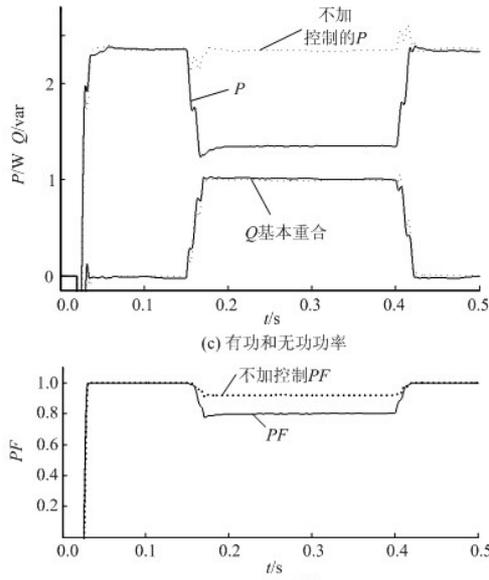


图 9 电压跌落 0.2 p.u.(a 相)

Fig. 9 Voltage sag 0.2 p.u.(phase a)

(The dotted line is the case without super-capacitor)

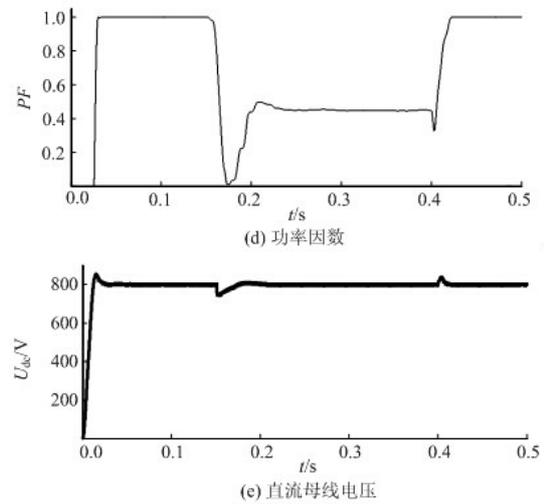
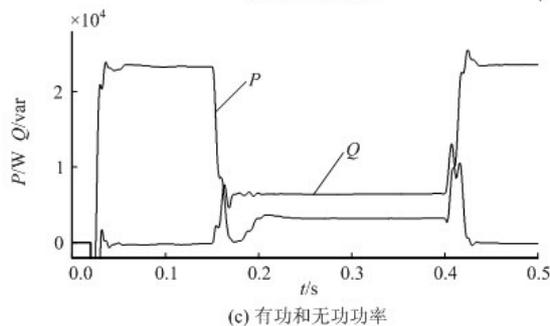
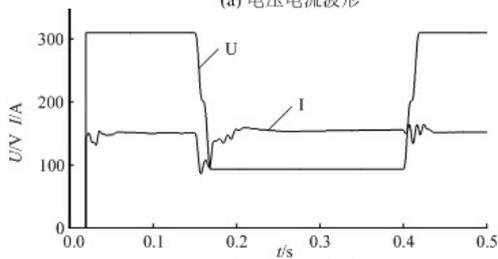
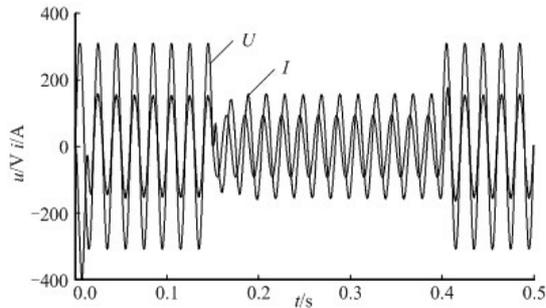


图 10 电压跌落 0.7 p.u. (a 相)

Fig. 10 Voltage sag 0.7 p.u. (phase a)

4 结论

本文基于超级电容储能的光伏并网发电系统提出了有功无功协调控制策略。仿真试验验证在电网扰动或故障引起并网点电压跌落时，超级电容能够有效地吸收短时较大的不平衡功率，实现系统的安全输出和直流母线电压稳定，并能保证逆变器对电网的无功功率能力支撑，帮助故障恢复，具有较强的低电压穿越能力。该策略合理地减少了无功补偿装置的投入，不改变光伏电池最大功率运行模式，通过超级电容对能量进行合理管理，使得系统具有很强的经济性。

参考文献

- [1] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101-107.
ZHAO Zheng-ming, LEI Yi, HE Fan-bo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.
- [2] HSU C W, LEE C T, CHENG P T. A low voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 2011, 47(4): 1821-1832.
- [3] 国家电网公司光伏电站接入电网技术规范(试行)[S]. 2009.
- [4] AZEVEDO G M S, VAZQUEZ G, LUNA A, et al. Photovoltaic inverters with fault ride-through capability[C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Seoul, Korea, July 5-8, 2009:

- 549-553.
- [5] ABBEY C, JOOS G Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability[C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, CA, USA, June 12-16, 2005: 1901-1907.
- [6] 张浙波, 刘建政, 梅红明, 等. 两级式三相光伏并网发电系统无功补偿特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 242-246.
ZHANG Zhe-bo, LIU Jian-zheng, MEI Hong-ming, et al. Study of reactive power compensation characteristics on a three-phase double-stage grid-connected photovoltaic power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 242-246.
- [7] CASTILLA M, MIRET J, SOSA J L, et al. Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2010, 25(12): 2930-2940.
- [8] 陈波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.
CHEN Bo, ZHU Xiao-dong, ZHU Ling-zhi, et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.
- [9] 邹和平, 于芑, 周玮, 等. 基于超级电容器储能的双馈风力发电机低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 48-52.
ZHOU He-ping, YU Peng, ZHOU Wei, et al. Study on the low voltage ride through of doubly fed wind generator based on the supercapacitor storage[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 48-52.
- [10] 侯世英, 房勇, 曾建兴, 等. 应用超级电容提高风电系统低电压穿越能力[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 26-31.
HOU Shi-ying, FANG Yong, ZENG Jian-xing, et al. Application of supercapacitors low voltage ride to improve wind power systems through capability[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(5): 26-31.
- [11] 傅望, 周林, 郭珂, 等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 211-226.
FU Wang, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211-226.
- [12] 王晓雷, 王卫星, 路进升, 等. 光伏阵列特性仿真及其在光伏并网逆变器测试系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 70-79.
WANG Xiao-lei, WANG Wei-xing, LU Jin-sheng, et al. Modeling of PV array characteristic and application in testing system of PV grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 70-79.
- [13] 袁建华, 高峰, 高厚磊, 等. 独立光伏发电系统统一能量控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 247-252.
YUAN Jian-hua, GAO Feng, GAO Hou-lei, et al. Unified energy control strategy of stand-alone photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 247-252.

收稿日期: 2013-09-12; 修回日期: 2013-11-12

作者简介:

刘耀远(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源与微网发电技术; E-mail: 840975822@qq.com

曾成碧(1970-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为能量转化技术的智能控制。