

基于 FB-PS-PWM 软开关技术的光伏发电 MPPT 研究

方波, 白政民, 张元敏

(许昌学院电气信息工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 对两级式光伏发电方案中 DC/DC 变换器进行了研究和设计。在变换器中同时采用了 FB-PS-PWM ZVS 软开关技术和稳定性好、可靠性高的改进型 CVT 控制策略, 并对 FB-PS-PWM ZVS 技术存在的滞后桥臂实现软开关较为困难、副边整流尖峰干扰和 CVT 控制策略的温度影响等问题进行了分析。通过采用可饱和电感和增加辅助谐振网络解决了滞后桥臂实现软开关较为困难的问题; 通过选用超快恢复二极管、在二极管回路中串入小电感、在变压器副边接入 RC 吸收网络等措施有效克服了副边整流尖峰; 通过增加一块相同特性的较小光伏电池, 实时检测其开路电压并按固定系数确定光伏最大工作点电压给定值, 解决了传统 CVT 受温度影响大的问题。变换器实验效率达 91.5%, 优于不采取软开关技术的其他 MPPT 方案。

关键词: 光伏并网发电系统; 最大功率点跟踪; 移相全桥 PWM; ZVS; DC/DC 变换器

Research of MPPT in PV system based on FB-PS-PWM ZVS soft-switching technology

FANG Bo, BAI Zheng-min, ZHANG Yuan-min

(School of Electric & Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: The DC/DC converter in a two-stage PV generation system is studied and designed. Both soft-switching technique of FB-PS-PWM ZVS and modified CVT control strategy with good stability and reliability are adopted in the converter. Analysis is performed on problems of implementing soft-switching in lagging leg, suppressing the interference of voltage spikes and resolving temperature effect on the performance of ordinary CVT. The problem which is difficult to implement soft-switching in lagging leg is resolved by adopting saturable inductance and auxiliary resonant networks. Voltage spikes of secondary polarity are suppressed effectively by using ultra-fast recovery diodes, adopting serially connected inductances in diodes loop, and employing RC absorbing networks in secondary polarity, etc. The problem which is the temperature significant effect on the performance of ordinary CVT is resolved by introducing a little PV cell and presetting the voltage at maximum PV point according to proportion of open circuit voltage. The efficiency of the converter is up to 91.5%, which is superior to other MPPT schemes without ZVS technology.

Key words: PV grid-connected system; MPPT; FB-PS-PWM; ZVS; DC/DC converter

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0071-05

0 引言

近年来在传统化石能源供应日趋紧张背景下, 太阳能光伏发电作为绿色新能源的一个重要组成部分受到了人们的高度关注, 对光伏发电系统集成研究主要集中在系统拓扑结构、最大功率点跟踪 (MPPT)、并网逆变器、控制方式等方面^[1-4], 研究目的主要是为了提高系统控制性能、可靠性和提高效率。目前对光伏发电 MPPT 研究较多, 如扰动观察法、增量电导法、模糊逻辑控制等, 这些算法

有其自身的优越性, 并且能够实现数字控制^[1,4-5], 但它们仅考虑控制策略本身的优化, 而未考虑整个系统的优化, 特别是将功率器件理想化, 忽略了开关器件的损耗, 往往得不偿失。由于单级式光伏并网存在较多的缺点且对光伏器件的输出电压有一定的要求, 因此目前光伏并网发电系统普遍采用两级式并网逆变结构^[3,6], 本文以两级式光伏并网发电系统为背景, 研究将软开关技术引入两级式拓扑结构的 DC/DC 变换器中, 采用改进型恒定电压跟踪 (CVT) 控制算法, 既能较好地实现最大功率点跟踪, 又能同时实现功率变换电路的软开关, 降低开关损耗, 从整体上提高系统效率, 并且工作稳定可靠。

基金项目: 河南省科技攻关计划项目 (082102240096); 河南省教育厅自然科学基金研究计划项目 (2008B470004)

1 光伏发电两级式拓扑结构的 DC/DC 变换器组成原理及其主要技术性能指标

为了最大功率点跟踪控制策略便于实现，光伏发电 DC/DC 变换器通常采用 Boost 电路或 Buck 电路，但这种单管非隔离结构的变换器的功率等级受到限制，并且无法实现电气隔离。本文采用移相全桥隔离式结构作为光伏 DC/DC 变换器的主电路，其组成原理如图 1 所示。

图 1 中， Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 组成 H 全桥逆变电路，T 为高频变压器， D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 L_r 、 C_o 组成高频全桥整流滤波电路， D_s 为防反充二极管、 C_i

为蓄能电容。全桥 DC/DC 变换器的作用主要是：①通过控制器给出的开关信号使负载与光伏阵列相匹配，保证光伏电池始终工作于最大功率点附近，实现最大功率点跟踪；②实现电气隔离。

因变换器采用了全桥型结构，故可实现中大功率的电能量变换，其主要性能指标如下：

光伏阵列由 8 块相同的光伏组件串联而成，单个光伏组件的电气参数为：开路电压 21.9 V，最大功率点时对应工作电压 17.6 V；短路电流 8.02 A，最大功率点时对应输出电流 7.39 A；单个组件最大输出功率 130 Wp；太阳能电池方阵峰值功率 1 kWp。

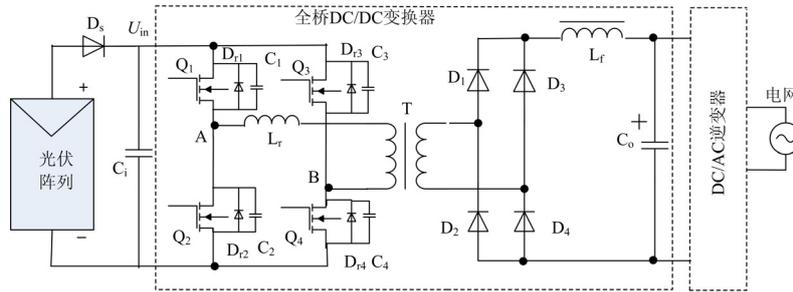


图 1 光伏 DC/DC 变换器的主电路组成原理图

Fig.1 Schematic diagram of full-bridge DC/DC converter in PV system

DC/DC 变换器：输入电压 140.8VDC±5%；输出电压 380VDC±15%；开关频率 100 kHz；效率≥90%

2 光伏移相全桥 DC/DC 变换器软开关技术原理^[7-8]

2.1 移相全桥 PWM 软开关 DC/DC 变换器的工作原理

图 1 中， Q_1 与 Q_2 、 Q_3 与 Q_4 构成 H 桥的两个桥臂，同一桥臂的两个 MOSFET 管的驱动信号为一对互补的方波信号，且留有死区以防直通。本文采用全桥移相 PWM 控制方式实现软开关。若将 Q_1 与 Q_2 作为超前桥臂，则 Q_3 与 Q_4 为滞后桥臂。四只功率 MOSFET 管的内部漏源极之间均存在反并二极管和漏源分布结电容，这为全桥移相控制实现谐振和开关管的软开关提供了可能。由控制器提供的四只管子的驱动信号及电路各处的波形如图 2。

由电路分析可知，一个完整的开关周期内共有 12 个工作模式。

(1) 开关模式 0 ($0 \sim t_0$)

Q_1 和 Q_4 导通，原边电流回路为： $U_{in+} \rightarrow Q_1 \rightarrow L_r \rightarrow$ 变压器原边绕组 $\rightarrow Q_4 \rightarrow U_{in-}$ ；副边电流回路：变压器副边绕组 $\rightarrow D_1 \rightarrow L_r \rightarrow C_o$ 和 Load $\rightarrow D_4 \rightarrow$ 变压器副边绕组。

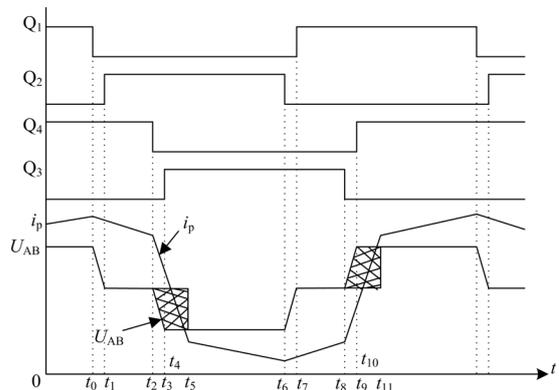


图 2 开关管驱动信号及电路各处的波形

Fig.2 Main waveforms of FB-PS-PWM DC/DC converter

(2) 开关模式 1 ($t_0 \sim t_1$)

原边电流回路： $U_{in+} \rightarrow C_1/C_2 \rightarrow L_r \rightarrow$ 变压器原边绕组 $\rightarrow Q_4 \rightarrow U_{in-}$ ；副边电流回路：变压器副边绕组 $\rightarrow D_1 \rightarrow L_r \rightarrow$ Load $\rightarrow D_4 \rightarrow$ 变压器副边绕组。由于 C_1 与 C_2 的存在， Q_1 关断为零电压关断。

(3) 开关模式 2 ($t_1 \sim t_2$)

原边电流回路： $U_{in-} \rightarrow D_{r2} \rightarrow L_r \rightarrow$ 变压器原边绕组 $\rightarrow Q_4 \rightarrow U_{in-}$ ；副边电流回路：变压器副边绕组 $\rightarrow D_1 \rightarrow L_r \rightarrow$ Load $\rightarrow D_4 \rightarrow$ 变压器副边绕组。在 t_1 时刻以后导通 Q_2 ，由于 L_r 和较大的原边电流， D_2 仍然导通，所以 Q_2 是零电压开通。

(4) 开关模态 3 ($t_2 \sim t_3$)

原边电流回路: $U_{in-} \rightarrow D_{r2} \rightarrow L_r \rightarrow$ 变压器原边绕

$$\text{组} \rightarrow \begin{cases} C_3 \rightarrow U_{in+} \\ C_4 \rightarrow U_{in-} \end{cases}$$

副边电流回路:

$$\begin{cases} \text{副边绕组} \rightarrow D_1 \\ D_3 \end{cases} \rightarrow L_f \rightarrow \text{Load} \rightarrow \begin{cases} D_2 \\ D_4 \rightarrow \text{副边绕组} \end{cases}$$

此过程利用 L_r 中的储能对 C_3 与 C_4 充放电, 如果 L_r 中的储能大于 C_3 与 C_4 充放电所需的储能, t_3 时刻 C_4 上的电压上升到 U_{in} , D_{r3} 自然导通给下一模态 Q_3 导通创造 ZVS 条件。否则, Q_3 失去 ZVS 条件。

(5) 开关模态 4 ($t_3 \sim t_4$)

原边电流回路: $U_{in-} \rightarrow D_{r2} \rightarrow L_r \rightarrow$ 变压器原边绕组 $\rightarrow D_{r3} \rightarrow U_{in+}$;

副边电流回路:

$$\begin{cases} \text{副边绕组} \rightarrow D_1 \\ D_3 \end{cases} \rightarrow L_f \rightarrow \text{Load} \rightarrow \begin{cases} D_2 \\ D_4 \rightarrow \text{副边绕组} \end{cases}$$

t_3 时刻 D_{r3} 自然导通。将 Q_3 电压钳位在零, 此后开通 Q_3 , Q_3 是零电压开通的。

(6) 开关模态 5 ($t_4 \sim t_5$)

原边电流回路: $U_{in+} \rightarrow Q_3 \rightarrow$ 变压器原边绕组 $\rightarrow L_r \rightarrow Q_2 \rightarrow U_{in-}$;

副边电流回路:

$$\begin{cases} D_1 \\ \text{副边绕组} \rightarrow D_3 \end{cases} \rightarrow L_f \rightarrow \text{Load} \rightarrow \begin{cases} D_2 \rightarrow \text{副边绕组} \\ D_4 \end{cases}$$

(7) 开关模态 6 ($t_5 \sim t_6$)

原边电流回路: $U_{in+} \rightarrow Q_3 \rightarrow$ 变压器原边绕组 $\rightarrow L_r \rightarrow Q_2 \rightarrow U_{in-}$; 副边电流回路: 变压器副边绕组 $\rightarrow D_3 \rightarrow L_f \rightarrow \text{Load} \rightarrow D_2 \rightarrow$ 变压器副边绕组。

t_6 时刻关断 Q_2 , 后半周期的工作情况与上述半个周期相类似。

2.2 ZVS 软开关的实现

由上述原理分析可知, 超前桥臂和滞后桥臂均有实现 ZVS 的可能性, 但两者情况不同。

(1) 超前桥臂容易实现 ZVS

在超前桥臂开关过程中, 输出滤波电感 L_f 折算到原边与 L_r 串联, 此时 ZVS 的实现利用了电感值很大的 L_f 中的能量, 因此 ZVS 很容易就能实现。

(2) 滞后桥臂实现 ZVS 比较困难

在滞后桥臂开关过程中, 变压器副边是短路的, 此时变换器原副边前后两部分是独立的, 用来实现 ZVS 的能量只是漏感中的能量, 它必须满足式 (1)。

$$\frac{1}{2} L_r I_2^2 > \frac{4}{3} C_{oss} U_{in}^2 \quad (1)$$

式中: I_2 为原边电流在 t_2 时刻的值; C_{oss} 为 MOSFET 开关管的输出结电容。由于只有 L_r 参与滞后桥臂 ZVS 的实现, 而 L_r 的值又很小, 因此滞后桥臂不容易实现 ZVS。

根据式 (1), 在 C_{oss} 、 I_2 、 U_{in} 均已确定的情况下, 为了使滞后桥臂也能实现 ZVS, 可考虑增大漏感 L_r 或加入谐振电感, 但这将不可避免地造成副边占空比的丢失, 如图 2 中阴影部分。解决这一矛盾的措施可采用可饱和电感替代谐振电感和增加辅助谐振网络。

2.3 副边整流脉冲尖峰及其抑制措施

图 1 全桥 DC/DC 变换器的另一个突出问题是副边整流脉冲尖峰问题。由于整流二极管存在反向恢复时间, 在二极管正向导通情况下突加反偏电压时, 其 PN 结内的非平衡少数载流子需要一段复合时间, 在此期间, 将流过一个较大的反向电流, 对于变压器二次侧相当于一个瞬时短路电流。该短路电流具有很大的电流变化率, 并产生很大的磁通变化, 当它们与任何形式的回路或导线交链时, 将产生不可忽视的感应电压, 最主要的表现就是整流脉冲前沿尖峰电压振荡。

前沿尖峰电压振荡是十分有害的, 由于它幅度大, 直接威胁整流管和整个系统的安全, 并且产生严重的 EMI, 对电路的其他部分和环境产生干扰, 必须加以抑制。抑制副边整流脉冲尖峰主要措施有:

(1) 选用反向恢复时间短且耐压高的超快恢复二极管, 本文选用 MUR1560 ($t_{rr}=60 \text{ ns}$, $U_{RRM}=600 \text{ V}$, $I_{F(AV)}=8 \text{ A}$);

(2) 在二极管回路中串入小电感抑制反向短路电流;

(3) 在变压器副边接入 RC 吸收网络;

(4) 适当增大整流二极管的电流容量;

(5) 元器件合理布局和布线等。

3 光伏 DC/DC 变换器 MPPT 的实现^[1]

3.1 恒定电压跟踪 (CVT) 控制策略

恒定电压跟踪 (CVT) 控制算法是最大功率点跟踪算法中最基本的一种, 具有实现方便、稳定可靠的优点。如果假设电池温度不变, 峰值工作点随光照强度变化时, 其峰值点处工作电压处在一个很小的范围内。CVT 即是控制光伏电池输出电压稳定在给定的峰值点处电压值附近, 达到最大功率点跟踪的目的, 其基本实现方法是通过闭环控制使光伏阵列输出电压保持在其最大功率点电压上。光伏 DC/DC 变换器作为光伏阵列与负载之间的匹配器, 可以通过改变占空比的大小来调节其工作状态。为了实现光伏恒定电压跟踪控制, 控制器从 DC/DC

变换器的输入电压端（亦即光伏阵列的输出端）取样进行闭环反馈，以达到稳定光伏阵列输出电压的目的。在光伏系统中DC/DC变换器要同时实现CVT控制和FB-PS-PWM ZVS，控制原理结构如图3。

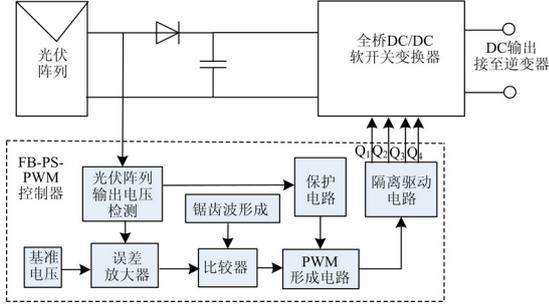


图3 CVT及FB-PS-PWM控制原理结构图

Fig.3 Schematic diagram of CVT&FB-PS-PWM

3.2 恒定电压跟踪控制的改进

光伏电池温度对峰值点电压值有显著影响，当温度升高时，峰值点电压值将减小。在温度大范围内变化时如果仍采用常规的恒定电压控制策略，光伏阵列的输出功率将会偏离最大功率点，产生比较大的功率损失。因此，为了克服季节、早晚时间以及天气情况和环境温度变化对系统造成的影响，本文在上述CVT算法的基础上采取如下解决方案：在光伏发电系统中增加一块与光伏阵列相同特性的较小的光伏电池模块，检测其开路电压，因开路电压

与最大 z 功率点电压在温度的变化时始终成近似线性关系，故可按照固定系数计算当前最大功率点电压 U_{max} ，本文选用KC50GT-2型多晶硅光伏电池，标准条件下 $U_{max}=17.6V$ ，开路电压 $U_{oc}=21.9V$ ，其比例系数为 $U_{max}/U_{oc} \approx 0.80$ 。改进电路如图4，将该电路输出电压 U_R 取代图3控制器中的基准电压作为控制器误差放大器的给定值。

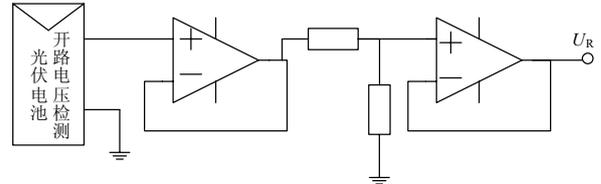


图4 CVT改进电路

Fig.4 Improved circuit for CVT

4 仿真与实验^[9]

本文对上述设计方案进行了仿真和实验，采用PSpice10.5作为仿真平台，仿真模型的技术参数如下：

光伏电池组件1组 ($U_{max}=17.5V$, $I_m=350mA$, $P_m=6W$);

DC/DC: 17.5V/32V, $f_s=100kHz$ 。FB-PS-PWM DC/DC变换器原副边电压及原边电流的仿真波形如图5所示，图6为采用CVT控制策略的仿真波形。

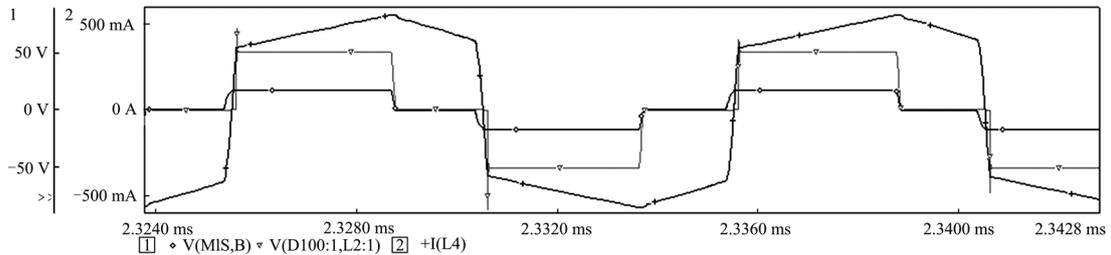


图5 DC/DC变换器原副边电压及原边电流的仿真波形

Fig.5 Main simulation waveforms of DC/DC converter

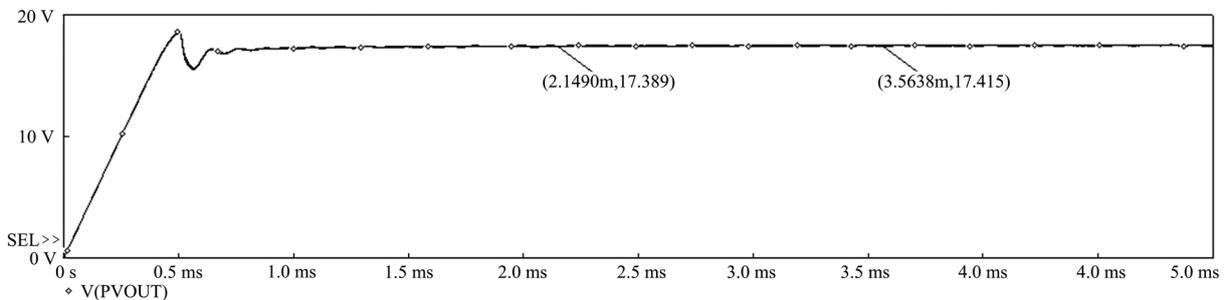


图6 采用CVT控制策略的光伏电池输出电压仿真波形

Fig.6 Output voltage simulation waveforms of PV cell in CVT control mode

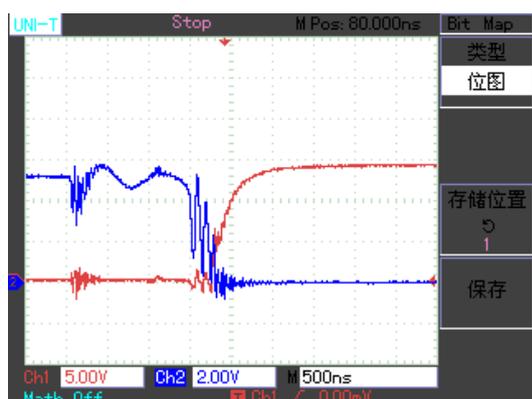
采用 KC50GT-2 型多晶硅光伏电池组件和新一代移相全桥 PWM 控制器 UCC3895 搭建了实验, 实验参数为: 光伏电池输出 DC52.8V, 功率 150 Wp, 高频逆变环节开关频率为 $f_s = 80 \text{ kHz}$ 。

图 7 为 DC/DC 变换器主变压器原副边电压实验波形, 图 8 (a)、(b) 分别为 DC/DC 变换器超前桥臂和滞后桥臂实现 ZVS 的实验波形。

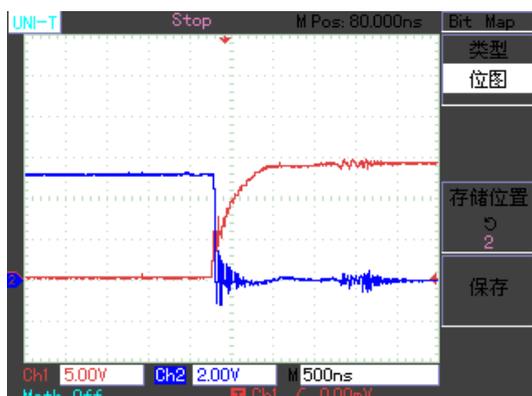


图 7 DC/DC 变换器原副边电压实验波形

Fig.7 Main test waveforms of DC/DC converter



(a) 超前桥臂 ZVS



(b) 滞后桥臂 ZVS

图 8 超前桥臂和滞后桥臂实现 ZVS 的实验波形

Fig.8 Test waveforms of ZVS in leading part and lag part of bridge

5 结论

本文以研制 1 kWp 光伏并网发电系统为背景, 对两级式光伏发电方案中 DC/DC 变换器进行了研究和设计, 在变换器中同时采用了 FB-PS-PWM ZVS 软开关技术和稳定性好、可靠性高的改进型 CVT 控制策略, 并对 FB-PS-PWM ZVS 技术存在的滞后桥臂实现软开关较为困难、副边整流尖峰干扰和 CVT 控制策略的温度影响等问题进行了分析, 并给出了解决和改进措施, 变换器实验效率达 91.5%, 优于不采取软开关技术的其他 MPPT 方案。仿真和实验表明, 本文基于 FB-PS-PWM 软开关技术的光伏发电 MPPT 的设计思想和方案是正确的, 设计方案是可行的。

参考文献

- [1] 赵争鸣, 刘建政, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, et al. Solar power photovoltaic generation and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 方波, 吕延会, 张元敏. 独立光伏系统具有高频环节逆变器研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (16): 61-65.
FANG Bo, Lü Yan-hui, ZHANG Yuan-min. Research and design of high frequency link inverter in stand-alone PV system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (16) 61-65.
- [3] 刘胜荣, 杨苹, 肖莹, 等. 两级式光伏并网逆变器的无差拍控制算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (8): 26-29.
LIU Sheng-rong, YANG Ping, XIAO Ying, et al. Algorithm research of deadbeat control for double-stage photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (8): 26-29.
- [4] 何薇薇, 杨金明, 张森. 光伏发电最大功率跟踪系统的研究[J]. 控制理论与应用, 2008, 25 (1): 167-171.
HE Wei-wei, YANG Jin-ming, ZHANG Sen. Photovoltaic maximum power point tracking system[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25 (1): 167-171.
- [5] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (19): 61-64.
SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (19): 61-64.
- [6] 张超. 光伏并网发电系统及孤岛检测新技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

(下转第 79 页 continued on page 79)

装置自适应以上各种运行方式,可根据接入的开关位置触点和其他电气量判断出工作电源和备用电源。当检测到工作电源故障时,装置跳开工作开关,确认跳开后,实时判断是否满足合闸逻辑,满足后合上备用开关,将备用电源投入,确保负荷“不停电”,生产不中断。

6 结语

本文就电源快速切换在工业企业低压母线的应用进行了阐述,针对在该电压等级应用遇到的问题,提出一个完整的解决方案,将电源快速切换装置与经过防晃电设计的交流接触器配合,使低压电机在面对电源故障情况下也可实现不停机的电源切换,为企业的连续生产及安全运行提供了一套行之有效的方案。

参考文献

- [1] 郭伟,叶留金. 厂用电切换方法的应用与研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 22(15): 26-29.
GUO Wei, YE Liu-jin. Study and application of power-supply-transfer between power plant motor bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 22(15): 26-29.
- [2] 兀鹏越,何信林,王团结,等. 厂用电大角切换问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 59-62.
WU Peng-yue, HE Xin-lin, WANG Tuan-jie, et al. Discussion of power supply transfer in big power angle[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 59-62.
- [3] 李经升,王舜,韩学义. 厂用电快速切换装置的应用研究[J]. 继电器, 2002, 30(7): 37-39.
LI Jing-sheng, WANG Shun, HAN Xue-yi. Application research on the auxiliary power high-speed transfer device[J]. Relay, 2002, 30(7): 37-39.
- [4] 刘增远,康小宁,郭峰. 厂用电电源切换时的相位差问题探讨[J]. 继电器, 2007, 35(11): 60-64.
LIU Zeng-yuan, KANG Xiao-ning, GUO Feng. Discussion on phase difference when plant source switching[J]. Relay, 2007, 35(11): 60-64.
- [5] 符建杰. “晃电”不停机的全面解决方案[J]. 电气时代, 2002(8): 68.
FU Jian-jie. An all-round solution to power shaking without machine shutdown[J]. Electric Age, 2002(8): 68.
- [6] 张伟. 380 V 低压电动机“晃电”问题的现状及研究[J]. 工程技术, 2009(17): 63.
ZHANG Wei. 380 V low-voltage motor shakes electricity problem current situation and go into[J]. Science & Technology Information, 2009(17): 63.
- [7] 吴宏伟. UPS 抗晃电技术及其应用[J]. 甘肃科技纵横, 2008, 37(2): 38-41.
WU Hong-wei. UPS resists to shake electricity technology and its application[J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2008, 37(2): 38-41.
- [8] 张朝伟. 抗晃电交流接触器应用技术[J]. 中低压电气技术, 2004(6): 47-48.
ZHANG Chao-wei. Applied technology of anti-panting AC contactor[J]. Electric Engineering, 2004(6): 47-48.
- 收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-07-14
作者简介:
苗世华(1979-),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统自动化; E-mail: miaoshihua_china@163.com
李杰(1979-),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统自动化;
宗洪良(1970-),男,硕士,研究员级高工,主要研究方向为电力系统自动化。
-
- (上接第 75 页 continued from page 75)
- ZHANG Chao. The research of maximum power point tracking control algorithm in photovoltaic grid-connected system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [7] 张先谋. 移相全桥软开关 DC/DC 变换器的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
ZHANG Xian-mou. Research on phase-shifted full-bridge soft switched DC/DC converter [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy Sciences, 2002.
- [8] 刘胜利. 现代高频开关电源实用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
LIU Sheng-li. Applied techniques of modern high frequency power supply[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [9] 方波,王晔. 基于 PSpice 的光伏并网系统仿真研究[J]. 现代电子技术, 2010, 33(4): 193-195, 198.
FANG Bo, WANG Ye. Simulation research on PV grid-connected system based on PSpice[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(4): 193-195, 198.
- 收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-04-16
作者简介:
方波(1973-),男,硕士,副教授,研究方向为电力电子与新能源发电技术; E-mail: fangboxc@126.com
白政民(1968-),男,副教授,高级实验师,研究方向为计算机应用;
张元敏(1963-),男,教授,研究方向为电力电子。