

基于自适应MPPT算法的光伏发电系统低压穿越的控制策略研究

童建林, 周有为, 钟雨哲, 余代海

(中冶赛迪电气技术有限公司, 重庆 400010)

摘要: 为确保系统故障时光伏发电系统有充分应对低压穿越的能力, 提出了一种自适应最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 算法的低压穿越的滑模控制策略。在逆变器输出电压为矢量控制基础上, 对逆变器输出的有功和无功进行解耦分析, 并以自适应最小均方差的电导增量法生成参照电压 U_{ref} , 且内环控制选取 PID 滑模模型保证光伏系统的输出电压紧跟 U_{ref} , 并在传统控制模型上增加自适应控制模块。在系统电压发生跌落时, 结合直流卸荷电路来保证逆变器直流电压稳定运行。结果表明所提出的控制策略能有效保证光伏发电系统的鲁棒性, 确保系统稳定运行和实现低压穿越。

关键字: 逆变器; 低压穿越; 自适应电导增量法; 最大功率跟踪

Research on control strategy of low voltage ride through of photovoltaic power generation system based on adaptive maximum power point tracking algorithm

TONG Jianlin, ZHOU Youwei, ZHONG Yuzhe, YU Daihai

(China Metallurgical CCID Electric Technology Co., Ltd., Chongqing 400010, China)

Abstract: In order to ensure that the photovoltaic power generation system has the ability to adequately cope with low voltage ride through when the system fails, A sliding mode control strategy of low voltage ride through with adaptive MPPT algorithm is proposed. Based on the vector control of the inverter output voltage, the active and reactive power output of the inverter is decoupled and analyzed, and the reference voltage U_{ref} is generated by the conductance increment method of adaptive minimum mean square error, and the inner loop control is selected. The PID third-order sliding mode model ensures that the output voltage of the photovoltaic system closely follows U_{ref} , and an adaptive control module is added to the traditional control model. And when the system voltage drops, the DC unloading circuit is combined to ensure the stable operation of the inverter DC voltage. The results show that the control strategy proposed in this paper can effectively ensure the robustness of the photovoltaic power generation system, ensure the stable operation of the system and achieve low voltage ride through.

Key words: inverter; low voltage ride through; adaptive conductance increment method; MPPT

0 引言

光伏发电作为一种可有效利用太阳能发电的清洁发电形式而获得广泛应用^[1]。然而大规模光伏发电并入电网后, 其分散式电源结构将对电网产生强烈冲击, 并因系统短路故障造成保护动作

导致光伏电源大规模脱网, 给电网系统的稳定运行带来严重影响^[2-3]。因此, 为了保证高渗透光伏并网后电网的稳定性不受影响, 分布式光伏电源系统应充分具备低压穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT) 的能力^[4]。

国家电网公司制定的Q/GDW 617—2011《光伏电站接入电网技术规定》^[5]企业标准中明确规定了大中型光伏电站在电网侧发生短路故障时，其所应对系统低压穿越能力的相关要求。且光伏电源在应对系统低压穿越的过程中，光伏系统应能提供可靠的无功支撑，从而有效避免光伏发电系统脱网运行。仅依靠常规电压、电流双环控制的策略很难规避系统故障时带来的低压穿越现象。另外，在电网侧电压跌落时，由光伏阵列输出的有功和逆变器输出的有功不匹配问题，将引起逆变器交流侧的电流骤增，从而使得光伏发电系统的直流电压急剧增大，因此极大可能损坏逆变器内部元件^[6]。光伏系统通过接入无功补偿装置来进一步弥补无功，忽视了光伏发电系统自身具备的无功调节能力，造成严重的资源浪费^[7]。因此，从研究光伏逆变器本身的控制策略为出发点，文献[8-10]在控制电路、参量计算、控制选择和滑面选取等方面进行了详细研究。为了改善系统“抖动”现象，一些学者针对滑模控制的方法进行了大量改进，例如，文献[11-12]采用了连续函数和饱和函数替换符号函数的方法，但仅通过替换符号函数的方法所获得的优化结果并不理想；文献[13]结合传统的矫正控制思路，增加了辅助项模块对光伏逆变器进行优化控制；文献[14]在矫正模型中增加了指数项模块，得到了滑模面的速度与其距离成反比的运动规律。然而以上的研究均选择了MPPT算法，或者利用数值分析方法对光伏逆变器的外环进行控制，或者利用内-外环控制思路对光伏逆变器进行优化控制，但未从系统发生故障的情况下开展自适应切换控制的策略研究的角度进行详细分析。

基于此，本文在内-外环控制模型的基础上，在逆变器外环控制模型中提出了一种基于自适应MPPT算法的滑模控制策略，以自适应最小均方差的电导增量法生成参照电压 U_{ref} ，且内环控制PID三阶滑模模型保证光伏系统的输出电压紧跟 U_{ref} ，并在传统控制模型上增加自适应控制模块，最后结合仿真来验证本文设计方法的优越性。

1 LVRT系统建模

光伏逆变器作为光伏并网系统中的核心元件，主要作用是将光伏直流逆变成交流后并入电网。光伏逆变器的等效电路如图1所示。

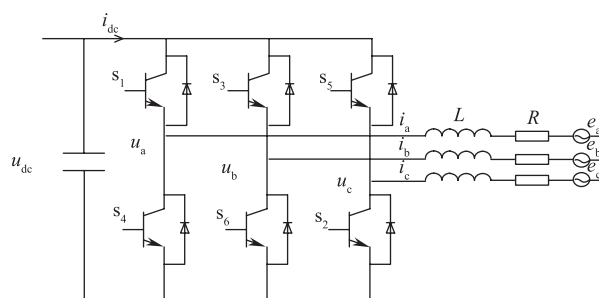


图1 光伏逆变器等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic inverter

图1中， e_a 、 e_b 和 e_c 表示电网侧的各相电压； i_a 、 i_b 和 i_c 表示并网相电流； u_a 、 u_b 和 u_c 表示逆变器输出的交流相电压； u_{dc} 表示逆变器的直流电压； R 表示逆变器输出的线路电阻； L 表示等效电感， C 表示直流系统电容。

利用基尔霍夫定律给出图1模型的电压方程为

$$\begin{cases} u_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a \\ u_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b \\ u_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c \end{cases} \quad (1)$$

采用光伏并网电压定向矢量双闭环控制策略，可实现系统并网电压稳态无差跟踪、动态快速响应及有功和无功解耦控制等功能。通常电压定向矢量控制方法均采用电流内环和电压外环的控制形式。为方便设计，须将控制对象由交流分量转换为直流分量，即利用同步旋转坐标系转化为逆变器控制变量。

结合Park坐标变换原理，逆变器三相输出电压经过坐标系变换后，可得出经变换处理的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = e_d - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q \\ u_q = e_q - Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_d 、 u_q 分别为变换后逆变器的输出电压; e_d 、 e_q 分别为变换后的电网电压; i_d 、 i_q 分别为变换后的并网电流; ω 为系统角频率。

电压定向矢量控制方法的核心思想是将 d 轴坐标和系统电压合成矢量 E 归置于同一轴线方向, 而 q 轴坐标和电压合成矢量 E 垂直。此时系统侧电压在 d 轴、 q 轴上的电压分量分别为 $e_d=E$, $e_q=0$ 。从而获得在 dq 坐标下光伏逆变器的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = E - \omega L i_q + R i_d \\ u_q = R i_q + \omega L i_d \end{cases} \quad (3)$$

结合文献[15], 经 dq 坐标系下逆变器输出的有功功率 P 和无功功率 Q 的表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) = \frac{3}{2} E i_d \\ Q = \frac{3}{2}(e_q i_d - e_d i_q) = -\frac{3}{2} E i_q \end{cases} \quad (4)$$

光伏逆变器的电压定向矢量控制原理图如图2所示。

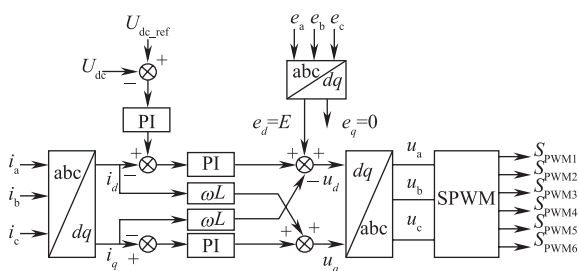


图2 光伏逆变器的电压定向矢量控制

Fig. 2 Voltage oriented vector control of photovoltaic inverter

图2中, U_{ref} 为光伏逆变器采用 MPPT 算法优化后所获得的系统直流电压参照值; i_d^* 、 i_q^* 分别为电流 i_d 、 i_q 的参照值。

从式(4)和图2可知, i_d 、 i_q 分别和 P 、 Q 呈线性关系。对有功电流 i_d 、无功电流 i_q 进行合理控制, 可分别实现控制逆变器输出的有功、无功, 以此实现光伏逆变器的有功、无功解耦控制, 从而为光伏并网系统的低压穿越奠定了理论基础。

2 LVRT 控制策略

2.1 自适应 MPPT 算法

在系统电压发生跌落的过程中, 光伏逆变器

既要保持并网运行状态, 还要跟踪系统电压来实现有功、无功的协调控制^[16], 逆变器提供适当无功, 支持系统电压快速恢复, 完成低压穿越。

1) 在系统电压运行正常时, 光伏逆变器应优先保证有功最大输出的跟踪控制, 其有功电流参照值 i_d^* , 可由图2的电压外环获取。而光伏逆变器利用自适应 MPPT 算法获得 u_{ref} , 该值和直流电压 u_{dc} 的差值通过 PI 调节器获得 i_d^* 。

2) 在系统电压跌落时, 鉴于光伏逆变器具备一定限流功能, 若继续按照优先控制有功的策略, 则逆变器无法为系统提供无功。因此, 该状态下逆变器应充分采用无功优先控制策略, 以获取无功电流参照值 i_q^* , 并结合文献[17]相关规定, 光伏逆变器的输出电流不能高于额定电流的1.1倍, 可获取 i_d^* 参照值上限约束, 表达式为

$$i_d^* \leq \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2} \quad (5)$$

式中, i_N 为系统侧额定电流。

结合文献[18], 以系统电压变化为约束量, 本文结合电压跌落深度来优化光伏系统的输出无功, 量化关系为

$$\Delta u = \left| \frac{u - u_N}{u_N} \right| \quad (6)$$

式中, u_N 为系统侧额定电压。

在系统发生低压故障时, 逆变器应选择 MPPT 调整输出有功, 并结合光伏阵列 $P-U$ 特征曲线作步长适应性调整, 曲线分布如图3所示。

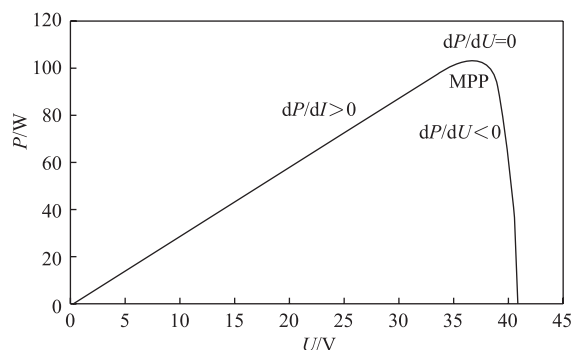


图3 光伏阵列 $P-U$ 曲线分析图

Fig. 3 $P-U$ curve analysis of photovoltaic array

鉴于传统的电导增量法采用的判据为

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} & \text{MPP左边} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} & \text{MPP点} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} & \text{MPP右边} \end{cases} \quad (7)$$

由上述分析可知,传统的电导增量法设置了固定步长 Δu_{step} ,该方法可降低系统振荡运行的风险,但难以满足对光伏最大功率的跟踪要求^[19],应予以相应改进。本文采用 dP/du 作为调节步长的动态因子,结合最小方差的附加因子 $M(k)$ 来进行修正,适应性调整方式为

$$\begin{cases} u(k+1) = u(k) \pm \Delta u \times \left| \frac{\Delta P}{\Delta u} \right|^{M(k)} \\ M(k) = \alpha \times (1 + e^{-\beta |S(k)|^2}) \\ S(k) = \lambda S(k-1) + (1-\lambda)dP \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\Delta u \times |\Delta P/\Delta u|$ 为自适应MPPT算法的变步长因子; α 、 β 均为调整因子; $S(k)$ 为有功变化量 $\Delta P(k)$ 的估计均值; λ 为遗忘系数。

自适应MPPT算法求解 u_{ref} 值流程如图4所示。

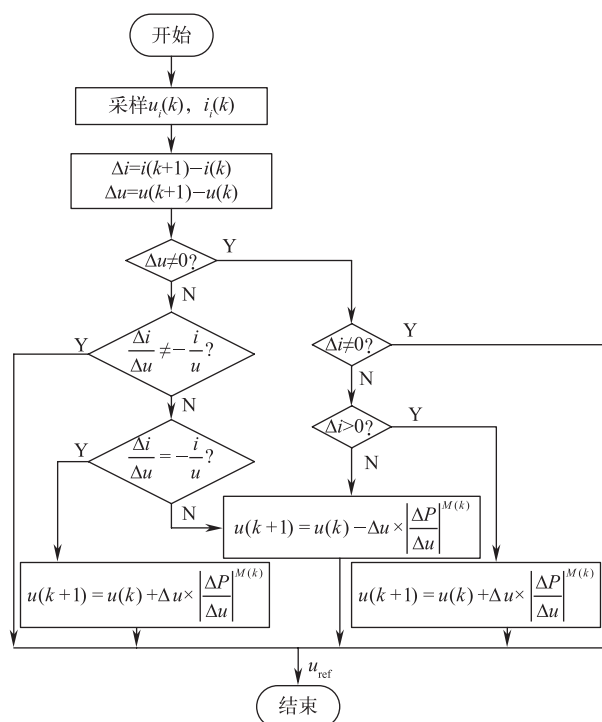


图4 直流电压自适应优化流程

Fig. 4 Adaptive optimal flow of DC voltage

系统电压发生跌落时,须结合系统电压的跌落深度适应性调节逆变器的输出无功,从而自适应调整 i_q^* 。

1) 当 $0.1 < \Delta u < 0.5$ 时,所需逆变器提供的无功电流为

$$i_q^* = 2\Delta u I_N \quad (9)$$

式中, I_N 为额定电流。

倘若逆变器处于最大电流状态下工作,则对应的有功电流为

$$i_{d1}^* = \sqrt{i_{\text{gmax}}^2 - i_q^{*2}} \quad (10)$$

式中, i_{gmax} 为逆变器输出的最大电流,不高于 $1.1 I_N$ 。考虑到光伏电池的输出功率受地域环境的影响,当系统电压跌落时,光伏电池将提供较小的有功,而逆变器的实际有功电流会小于 i_{d1}^* ,该状态下有功电流的参照值应选取电压环控制的 i_{d2}^* 。若 $i_{d2}^* > i_{d1}^*$,有功电流的参考值取 i_{d1}^* ;反之,取 i_{d2}^* 。

2) 当 $0.5 < \Delta u < 0.9$ 时,逆变器输出的无功电流为

$$i_q^* = I_N \quad (11)$$

逆变器按照最大电流输出的原则,其输出的有功电流为

$$i_{d1}^* = \sqrt{i_{\text{gmax}}^2 - i_q^{*2}} \quad (12)$$

同理该状态下,依然按照 $i_d^* = \min(i_{d1}^*, i_{d2}^*)$ 选取 i_d^* 。

2.2 系统正常/故障方式下的切换方案

(1) 正常运行时电压控制策略

系统电压正常运行时的控制流程如图5所示,主要包含电压和电流双闭环控制、空间矢量脉宽调制算法、三角载波发生器和比较器四部分。

图5中, e_a 、 e_b 和 e_c 分别表示光伏逆变器三相输出电压。电压外环的主要作用是对逆变器的直流输入电压进行有效控制,促进逆变器能快速准确地跟随最大功率点的参照电压。电流内环的主要作用是对逆变器输出的 dq 轴电流实施解耦控制,且通过PI控制器分别对有功电流 i_d 和无功电流 i_q 进行调节,使其紧密跟随 i_d^* 和 i_q^* 的变化。通常, i_q^* 设置为0,保证光伏逆变器的输出电流和系统电压同频同相,即功率因素 $\cos\theta=1$ 。

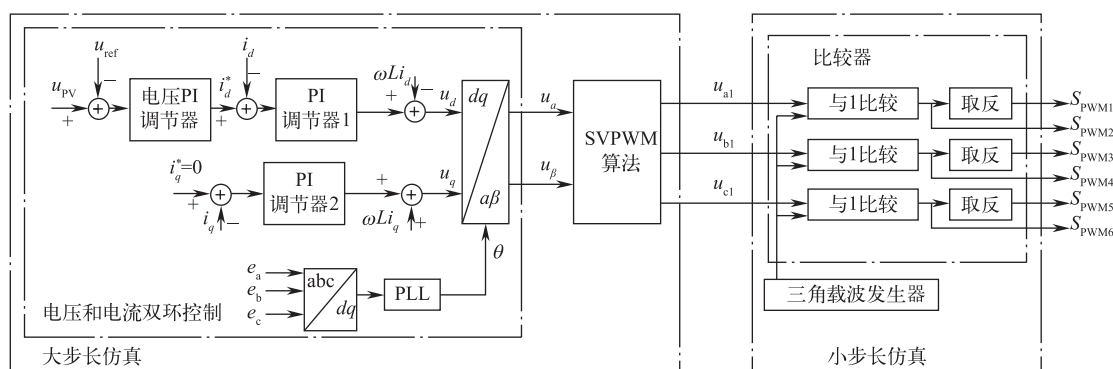


图5 系统正常运行时的电压控制

Fig. 5 Voltage control during normal operation of the system

通过 u_d 、 u_q 及PLL模块捕获的系统电压相角计算 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压相量 u_α 、 u_β 。由此可利用SVPWM模块主要作用是可根据SVPWM算法获得调制波 u_{a1} 、 u_{b1} 和 u_{c1} 。通过比较器处理后获得驱动脉冲信号 $S_{PWM,i}(i=1,2,3,\dots,6)$ 。

(2) 故障状态下的电压控制方法

当系统故障发生电压跌落时，结合文献[20]，本文在光伏逆变器直流侧设计一套卸荷电路，如图6所示。本文设计的卸荷电路主要用于消耗逆变器直流侧多余的电容功率，有效抑制逆变器直流侧的电压波动，从而有效提高光伏并网系统穿越低电压的能力。

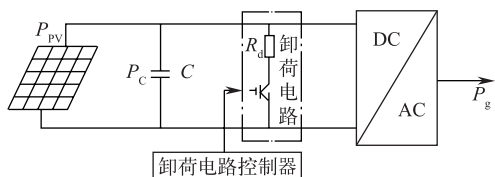


图6 卸荷电路结构

Fig. 6 Unloading circuit structure

图6中，设计的逆变器直流卸荷电路主要由功率元件与卸荷电阻 R_d 形成串联关系。电路投入/切除受控制元件控制。

图7表示卸荷电路的控制原理，其控制器主要用于监测光伏电池和逆变器的有功输出 P_{pv} 、 P_g 以及系统直流电压 u_{dc} ，以此来判断有无必要投入卸荷电路。其投入/切除控制流程为：

当系统电压发生跌落时，通过计算 $P_{pv}-P_g$ 获取功率差值 ΔP ，并对 ΔP 进行比较：①当 $\Delta P \leq \Delta P_{max}$ 时，不采取投入卸荷电路操作；②当 $\Delta P > \Delta P_{max}$

时，须采取投卸荷电路的操作，利用PI控制器对 ΔP 进行适应性调节，从而输出PWM信号；③当 $\Delta P \leq \Delta P_{max}$ 条件再次满足时，须采取退出卸荷电路的操作，并以系统直流电压 u_{dc} 作为辅助比较条件，在系统直流侧电压为 u_{dc-max} 时，将卸荷电路投入控制系统；而在系统直流侧电压小于 u_{dc-max} 时，则相应退出。

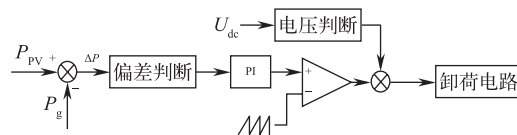


图7 卸荷电路控制器原理

Fig. 7 Principle of unloading circuit controller

(3) 切换控制策略电压跌落时直流电压波动抑制方法

当系统电压发生跌落时，为保证光伏逆变器不脱网，且能保持很好的动静态响应，本文提出如下转换控制策略。

1) 当感应元件感应到系统电压跌落时，会锁存控制回路中的有功给定电流 i_d^* ，并对系统电压跌落期间的给定有功电流 i_{dref} 进行赋值，促进系统跌落电压同系统正常运行电压、电流相一致，从而保证系统运行的稳定性。

2) 在系统运行电压正常时，控制电流内环利用PI控制器进行调节，而系统电压发生跌落后将采取PID控制器进行调节，利用积分优势来提高系统电低压穿越的稳定性，并提升系统电压恢复时的暂态性能。

3) 在系统电压运行正常时，采用电压-电流

双环控制模式；而系统电压跌落时，将选取电流单环控制策略，且系统电压恢复正常时，读取系统电压跌落时锁存的直流电压 U ，并赋值给最大功率点跟踪参照电压，从而提高电压外环的动态响应，保证直流电压平滑变化。

3 算例仿真

本文选取某地区一个园区容量为50 kW的光

伏并网系统进行建模仿真，以测试光伏发电系统的低压穿越能力，其模型如图8所示。设定光伏并网系统逆变器直流侧的参照电压 u_{ref} 为700 V，系统侧出口电压为400 V，配电网系统的额定电压为380 V，系统频率为50 Hz。光伏阵列可提供的最大功率为 $P_m=50$ kW，逆变器容量为 $S=50$ kW。主电路部分参数见表1，其余参数见文献[21]。

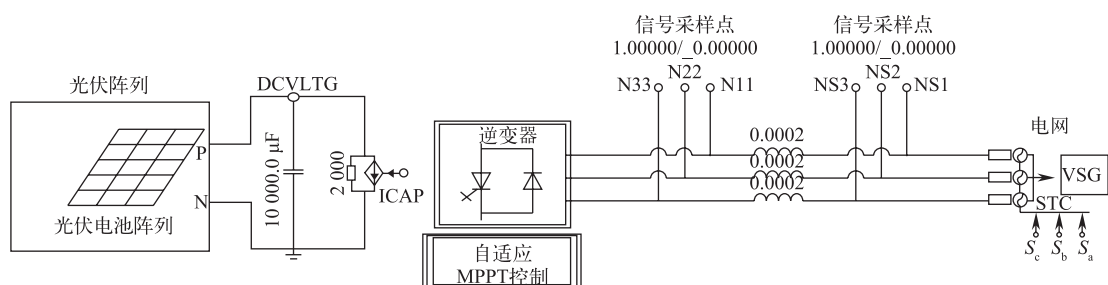


图8 仿真模型

Fig. 8 Simulation model

表1 系统部分参数配置

Tab. 1 Configuration of some system parameters

参数	数值
最大功率点电压/V、电流/A	35、7.33
光伏电池开路电压/V、短路电流/A	43.5、7.73
光伏电池最大功率输出/W	260
光伏阵列串/并联数	10/40
系统侧滤波电感/mH	160
电容 C_{pv} /F	1×10^{-3}
电容 C_{dc} /F	1×10^{-1}
系统侧频率/Hz	50
直流侧参考电压/V	700
直流侧卸荷电阻/ Ω	25

3.1 仿真分析

通过优化仿真，系统电压运行正常时的仿真波形如图9~图12所示。在外界温度及光照条件充裕的情况下，光伏发电系统可接近系统容量输出的有功。

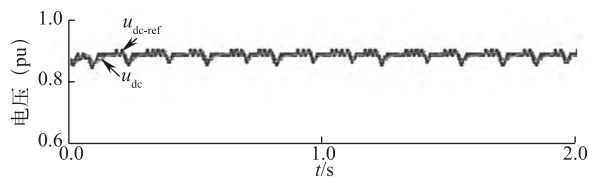


图9 光伏系统最大功率跟踪

Fig. 9 Maximum power tracking of photovoltaic system

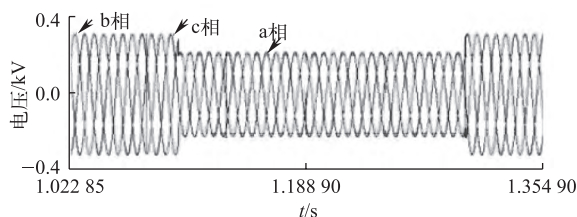


图10 系统并网点电压

Fig. 10 System parallel node voltage

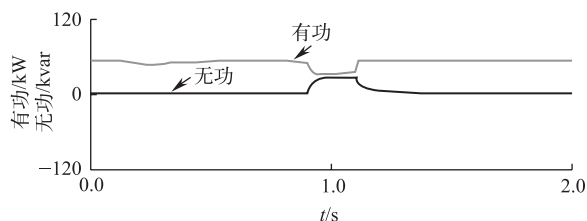


图11 光伏逆变器输出的有功和无功

Fig. 11 Active and reactive power output by photovoltaic inverter

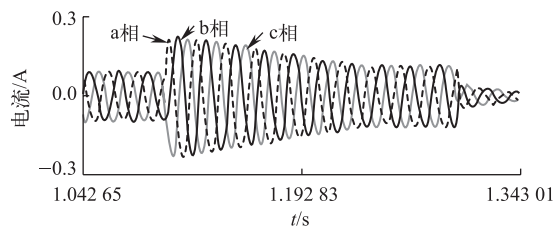


图12 光伏逆变器入网侧电流

Fig. 12 Current at grid side of photovoltaic inverter

在本文自适应MPPT控制策略的优化基础上,光伏逆变器的前级直-直变换器选择自适应MPPT控制方法,优化结果如图13~图15所示。

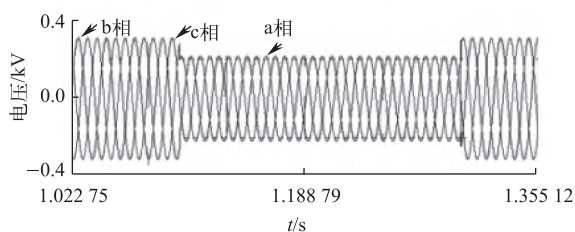


图 13 系统并网点电压
Fig. 13 System parallel node voltage

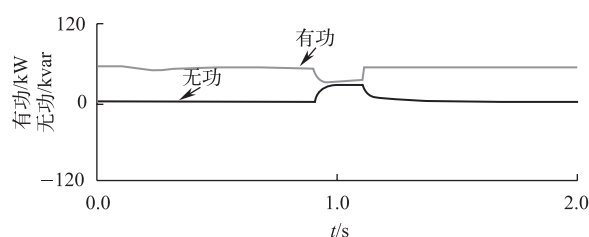


图 14 光伏逆变器输出的有功和无功
Fig. 14 Active and reactive power output by photovoltaic inverter

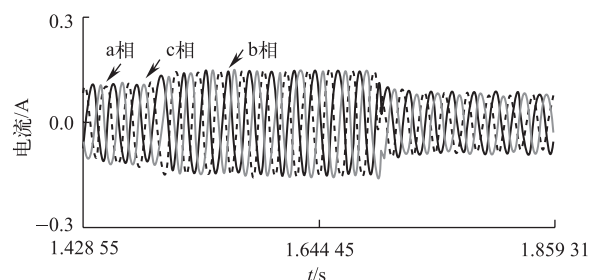


图 15 光伏逆变器入网侧电流
Fig. 15 Grid side current of photovoltaic inverter

在上述仿真基础之上,设置 $t=1$ s时刻系统电压跌落到 $0.7U_N$,经过0.2 s后系统故障消除,则系统电压逐渐恢复。监测光伏并网点处的系统电压波形如图16所示。故障前光伏阵列以自适应MPPT运行,且逆变器的输出有功满足逆变器容量范围内运行,光伏逆变器的前级直-直变换器始终保持MPPT控制,如图17所示。另外,在光伏系统LVRT期间,光伏逆变器的输出电流限定在 $1.1I_N$ 内,如图18所示。

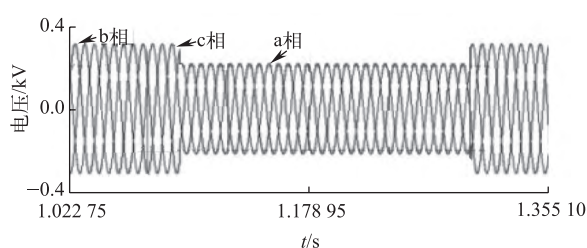


图 16 系统并网点电压
Fig. 16 System parallel node voltage

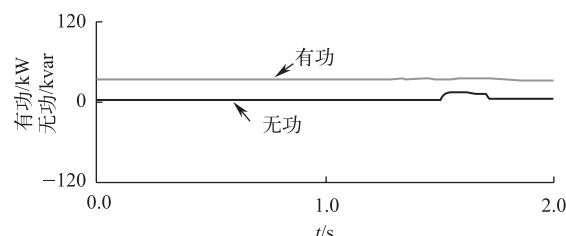


图 17 光伏逆变器输出的有功和无功
Fig. 17 Active and reactive power output by photovoltaic inverter

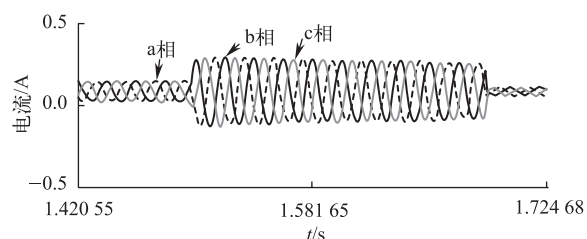


图 18 光伏逆变器入网侧电流
Fig. 18 Current at grid side of photovoltaic inverter

由上述图中可知,光伏并网系统在LVRT期间,结合本文所建立的自适应MPPT控制模式,可充分利用光伏逆变器的容量,在实现光伏系统LVRT同时,可最大限度地向系统注入无功,并向系统提供无功支撑,从而极大地降低投入无功补偿设备的成本。

3.2 控制策略优势对比

结合本文所提的自适应MPPT算法及切换策略,仍设置在1.0 s时刻系统发生短路故障,并投入直流卸荷电路,促进光伏阵列提供的有功尽量全部消耗在卸荷电阻上。1.5 s时刻系统恢复,退出直流卸荷电路,系统返回到初始状态。并以下列给出的三种指标进行评价:①逆变器直流电压 u_{dc} 由偏离基值得到恢复的响应时间 t_s ;②发生故

障后逆变器直流电压 U_{dc} 的波峰值 U_{max} ；③系统故障后，逆变器直流侧的波峰电压 U_{max} 超出基准电压的 $\sigma\%$ 。对传统PI控制方法、MPPT和自适应MPPT三种控制策略所优化的结果进行对比，效果如图19所示，三种方法下的指标测试见表2。

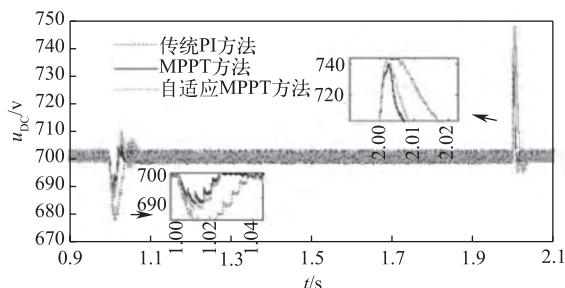


图 19 三种优化方法比较

Fig. 19 Comparison of three optimization methods

表 2 三种方法下的指标测试

Tab. 2 Index test under three methods

方法指标	t/s	U_{max}/V	$\sigma\%$ (%)
传统 PT 方法	0.13	776.3	-2.65
MPPT 方法	0.10	784.8	-1.82
自适应 MPPT 方法	0.06	787.5	-1.45

在 $t=1.0$ s时刻系统发生短路故障后，图19中反映了自适应MPPT策略抗扰动能力优于MPPT策略，而PI控制策略效果最差。表2反映了自适应MPPT控制策略抑制系统电压波动的效果最佳， $\sigma\%$ 值接近为1.5%；MPPT控制策略次之， $\sigma\%$ 值接近为2%，PI控制效果最差， $\sigma\%$ 值接近为3%。此外，自适应MPPT控制策略能以0.06 s的响应时间最先恢复至稳态，MPPT控制策略约为0.1 s，而PI控制策略所需的响应时间最长，约为0.12 s。

通过上述结果分析，充分论证了本文所提的自适应MPPT控制策略具有很好的抑制系统扰动能力，且能及时针对系统的运行状态作适应性调整，从而确保光伏并网系统不脱网运行。

4 结束语

本文针对光伏发电系统在并网运行时所经历的LVRT问题开展相应研究。结合光伏并网逆变器的电压-电流双闭环矢量方法，实现对光伏发

电系统的有功、无功解耦控制。基于该基础本文提出了自适应MPPT的LVRT优化控制策略，并得出以下结论：

1) 自适应MPPT控制策略对系统电压的波动起到良好的抑制效果， $\sigma\%$ 值接近为1.5%；而采用MPPT控制策略的 $\sigma\%$ 值接近为2%；单独采用PI控制效果最差，其 $\sigma\%$ 值接近为3%。此外，自适应MPPT控制策略能以0.06 s的响应时间最先恢复至稳态，MPPT控制策略约为0.1 s，而PI控制策略所需的响应时间最长，约为0.12 s。从时间响应角度分析，自适应MPPT控制策略最优。

2) 针对电网系统的正常/故障运行状态，设计了光伏系统并网的切换方法，由电网侧发生短路故障而引起系统电压跌落时，将启动直流卸荷电路来抑制直流电压波动，且能一定范围内补偿无功，从而促进系统电压恢复正常运行水平，确保光伏发电系统不会发生脱网风险。

参考文献

- [1] 何进，黄鑫．光伏发电在城市轨道交通的应用研究[J]．电气应用，2018，37(10)：31-35．
- [2] 盛四清，侯磊，范辉，等．光伏电站接入孤立电网的动态建模与稳定性分析[J]．电力系统保护与控制，2012，40(23)：127-131．
- [3] 张浙波，刘建政，梅红明．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(1)：242-246．
- [4] MA Lin, LIAO Hua, LI Jing. Analysis of Chinese photovoltaic generation system low voltage ride through characters[C]//2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, 2012.
- [5] 国家电网公司．光伏电站接入电网技术规定：Q/GDW 617—2011[S]．北京：国家电网公司，2011．
- [6] 张雅静，郑琼林，马亮，等．采用双环控制的光伏并网逆变器低电压穿越[J]．电工技术学报，2013，28(12)：136-141．
- [7] 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.
- [8] 周泽龙. 基于改进型MPPT的并网型光伏逆变器系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [9] 朱少斌, 李少纲. 基于超级电容的永磁直驱风电机组低电压穿越控制研究[J]. 电气技术, 2017(2): 20-24.
- [10] 吉宇, 王生强, 程亮, 等. 基于MMC的光伏并网发电系统控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 146-153.
- [11] 王贤东, 邵如平, 李艳. 基于滑模变结构与内模控制相结合的VIENNA整流器控制策略研究[J]. 电子技术应用, 2018, 44(9): 150-153.
- [12] 冯骞, 刘桂英, 欧阳盟盟, 等. 基于滑模变结构及内模控制的SVG无功补偿控制策略仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 44(5): 40-45.
- [13] 郑堃, 周林, 张前进, 等. 数字控制下光伏并网逆变器稳定性分析及参数优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1802-1813.
- [14] 蒋俊祁. 基于非奇异快速终端滑模控制光伏并网逆变器最大功率跟踪研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(7): 1022-1026.
- [15] 朱四维, 田铭兴, 王江彬. 广义瞬时功率理论及其在电流检测中的应用研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(9): 110-116.
- [16] 贾利虎, 朱永强, 孙小燕, 等. 基于模型电流预测控制的光伏电站低电压穿越控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 68-74.
- [17] 雷红玲, 杨畅, 李建飞, 等. 基于改进二阶广义积分锁相的LVRT控制策略[J]. 电气应用, 2018, 37(16): 38-41.
- [18] 盛四清, 陈玉良. 基于功率预测的新型变步长电导增量法最大功率点跟踪策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017(23): 42-48.
- [19] 刘栋, 杨萍, 黄锦成. 一种光伏发电系统变步长MPPT控制策略研究[J]. 电气传动, 2011(4): 35-38.
- [20] 安志龙. 光伏并网控制策略与低电压穿越技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [21] 解吉蕾, 杨秀, 王巨波. 基于MPPT运行模式的光伏发电系统低电压穿越无功控制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3426-3434.

作者简介

童建林(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为计算机软件系统设计与开发。

周有为(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事企业/园区智能配电网、智能微电网、风光储一体化项目等相关工作。

钟雨哲(1988—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统优化和变电站二次设计。

余代海(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统优化和变电站二次设计。

(收稿日期: 2022-02-18)