

两级式光伏发电系统低电压穿越控制策略研究

郭勇, 李勇, 皇甫星星, 丁勇, 石祥建, 刘为群

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:随着中功率两级式光伏逆变器在大中型发电系统中的大规模应用,基于两级式光伏逆变器的低电压穿越控制技术得到越来越多的研究。与单级式光伏逆变器相比,两级式光伏逆变器存在前级DC/DC变换器和后级DC/AC逆变器,控制更复杂,低电压穿越难度更大。文中首先进行了系统建模,然后提出了一种基于控制模式无缝切换的低电压穿越控制策略,DC/DC变换器在稳态时作为MPPT控制器进行最大功率点跟踪,DC/AC逆变器作为恒压源稳定直流母线电压。在低电压穿越时,DC/DC变换器以恒直流母线电压方式运行,DC/AC逆变器以有功无功模式运行。此方法可以解决低电压穿越过程中有功不匹配而导致的直流母线过压的问题。最后,通过在一台40 kW的两级式光伏并网逆变器样机上进行实验,验证了理论分析的正确性及可行性。

关键词:两级式光伏发电系统;低电压穿越;控制模式无缝切换

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)06-0007-07

0 引言

在大中型光伏并网发电系统中,越来越多的光伏电站采用中功率两级式光伏逆变器实现光伏的并网发电,其优点是多路MPPT、宽范围直流输入、交流侧并网电压灵活、效率高,前级Boost电路完成最大功率点跟踪(MPPT)及升压,后级T型三电平逆变电路完成PLL锁相以及并网逆变功能。单台两级式光伏逆变器功率范围在40~80 kW,在大中型光伏电站中每1 MW发电单元组成的光伏方阵中通常有12至30台两级式光伏逆变器。当光伏电站渗透率较高或出力加大时,电网发生故障引起电网电压大幅度跌落,光伏电站的故障脱网会恶化整个电网的运行状态,影响电网的安全稳定运行,现行标准GB/T 19964—2012中要求光伏电站须具备低电压及零电压穿越功能(LVRT/ZVRT)^[1]。

两级式光伏逆变器MPPT范围宽,前级DC/DC变换器工作在MPPT模式或者旁路模式,在低电压穿越发生或者恢复时,由于电网电压的突变极易引起前后级变换器之间有功的不匹配,导致直流母线电压升高而触发过电压保护引起脱网问题。因而以两级式光伏逆变器构成的光伏电站的低电压穿越技术成为光伏逆变器的一个研究课题。

目前针对电网跌落,文献[2]引入风电技术的卸荷电阻的方法消耗不平衡功率,文献[3]针对两级式光伏发电系统提出了一种基于有功平衡的开

环控制减小直流母线电压波动的LVRT控制策略,但该策略没有在本质上维持母线电压的平稳。文献[4]针对两级式光伏发电系统提出了一种LVRT控制策略,该策略采用功率闭环方法维持前后级之间的功率平衡,但本质上仍然为开环控制方法,其功率测量的准确度以及两级间的附加功耗决定了算法的有效性,而且该控制策略没有考虑不平衡跌落的工况。文献[5]也采用功率闭环维持前后级之间功率平衡的方法进行低电压穿越,由于实验条件的限制仅做了仿真分析。文献[6]在两级式光伏逆变器LVRT时降低光伏阵列的输出电压,使光伏阵列工作在其PV曲线的左半平面,以降低LVRT恢复时升高的母线电压,由于逆变器低电压穿越期间工作在光伏阵列PV曲线的左半平面,可能引起系统直流母线电压崩溃,引发不稳定现象^[7]。

针对上述问题,文中提出一种两级式光伏逆变器低电压穿越控制方法。前级DC/DC变换器采用一个公用的电流环,2个分时作用的电压环,通过设计电流环的稳定性,来增强低电压穿越过程中系统的稳定性,在稳态工作点大范围变动的情况下,通过限制占空比(减小超调量)使逆变器工作在光伏P-V曲线的右半平面,防止系统出现母线电压崩溃的稳定性问题;通过控制前级DC/DC2个分时作用的电压环的无缝切换,以及后级逆变器控制模式,解决现有采用常规控制策略在电压跌落过程中前后级变换器之间有功不匹配导致直流母线电压升高而脱网的问题,并且能够保证逆变器在故障清除后以一个可调速率将有功功率恢复至跌落前的功率水平。

收稿日期:2017-07-03;修回日期:2017-08-02

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050101)

1 两级式光伏逆变器系统模型

光伏发电系统原理如图 1 所示。两级式光伏系统包括光伏阵列、前级 Boost 变换器、后级逆变桥和控制系统 4 部分。Boost 变换器作为 MPPT 控制器控制光伏组件运行在最大功率点上并且将光伏阵列输出电压升高,后级逆变器通过调节入网电流的大小保持直流母线电压恒定,前后级变换器共用一个控制器。

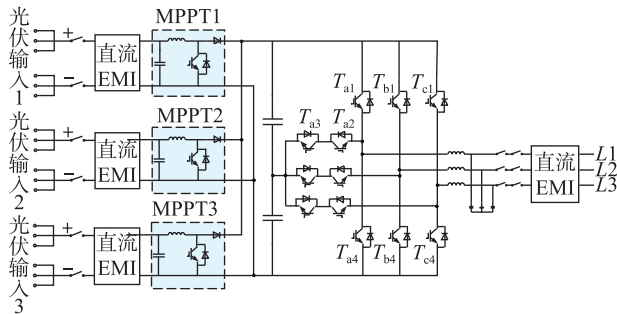


图 1 光伏发电系统原理

Fig.1 Principle of photovoltaic power generation system

1.1 MPPT 控制器分析

根据不同的反馈变量,Boost 型 MPPT 控制器的控制方法可分为 4 类:(1)功率反馈控制型^[8];(2)电流反馈控制型;(3)电压反馈控制型^[9];(4)电流电压反馈控制型^[10-12]。文中采用加校正环节的双闭环控制系统进行建模分析。

在正常工作时,Boost 变换器通过光伏输出电压环将光伏输出电压稳定在最大功率点电压上,当 LVRT/ZVRT 故障时,Boost 变换器通过直流母线电压环调节 Boost 电感电流控制直流母线电压保持恒定,2 个电压环的输出通过切换开关作为同一个电流环的给定,如图 2 所示。

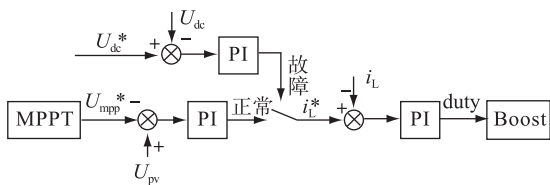


图 2 Boost 变换器控制框图

Fig.2 The control scheme of the Boost converter

在低电压穿越期间光伏输出电压环积分值保持不变,以便故障恢复后光伏阵列能迅速追踪到最大功率点,后级逆变器减少有功,输出无功支持电网恢复,低电压穿越结束后延时 T_{delay} 时间保持故障控制模式不变,后级逆变器有功负荷以一定速率恢复至低电压穿越前的值,无功给定减小至 0。最后,所有控制方式切换到发生低电压穿越前的正常工

作模式,MPPT 重新投入恢复到之前的状态。由于在正常 MPPT 模式以及低电压穿越时始终进行电流闭环调节,通过相应的校正环节将电流内环设计成近似一阶惯性环节,这样不但很容易实现系统稳定性要求,而且可以采用小信号模型。由于小信号模型是线性的,所以可方便地考虑系统的动态响应特性^[13]。

在进行 Boost 控制系统设计时,必须建立控制对象的数学模型,为了设计电压环及电流环控制器,文中利用小信号平均的方法,建立 Boost 电路的状态空间平均模型^[12],当电流环控制器采用 PI 调节器时,简化的 Boost 电流环结构框图如图 3 所示。

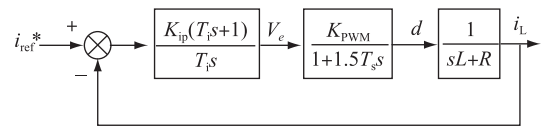


图 3 简化的 Boost 电流环结构框图

Fig.3 Simplified block diagram of the Boost based current feedback control

考虑电流内环需获得较快的电流跟随性能时,可按典型 I 型系统设计电流调节器,从开环传递函数可看出,只需以 PI 调节器零点抵消电流控制对象传递函数的极点即可,即 $T_i = L/R$ 。校正后,电流内环的开环传递函数为:

$$G_{oi}(s) = \frac{K_{ip}K_{PWM}}{RT_i s(1 + 1.5T_s s)} \quad (1)$$

两级式光伏发电系统属于变流器级联系统,在低电压穿越时系统的稳态工作点发生剧烈变化,级联系统的大信号稳定性与小信号稳定性不同;级联系统在一个稳态工作点下的小信号稳定性不能保证系统在大信号扰动下的稳定性。这是因为系统本身在大信号扰动下不具备传统小信号意义上的稳态工作点,传统的线性化状态空间法不再适用,基于小信号模型的阻抗分析方法或传递函数劳斯判据不再适用。大信号条件下的稳定性对系统在启动、负载突变以及非线性负载等工况下十分重要。根据 Boost 变流器的大信号模型可以得到^[12]:

$$D_{min} < D_0 - f^T \hat{x} < D_{max} \quad (2)$$

可采用下述 2 种方法使系统避免系统失去稳定^[13]:(1)缩小变流器的占空比区间 $[D_{min} D_{max}]$;(2)增大 W ,并且增大 k_1 ,是斜线 l_1 左移,落到闭环控制区域。方法 1 意义明确且容易实现,在低电压穿越场合 MPPT 控制器的动态响应特性也满足标准要求,文中采用方法 1。

1.2 三电平逆变器建模分析

与两电平类似,定义开关函数如下:假设 $S_i (i =$

a, b, c) 为第 i 相的开关函数, 则:

$$S_i = \begin{cases} +1, T_{i1} \text{ 和 } T_{i2} \text{ 导通, 并且 } T_{i3} \text{ 和 } T_{i4} \text{ 关断} \\ 0, T_{i2} \text{ 和 } T_{i3} \text{ 导通, 并且 } T_{i1} \text{ 和 } T_{i4} \text{ 关断} \\ -1, T_{i3} \text{ 和 } T_{i4} \text{ 导通, 并且 } T_{i1} \text{ 和 } T_{i2} \text{ 关断} \end{cases} \quad (3)$$

这样可以得到简化电路模型, 如图 4 所示。为了方便分析, 将开关函数 S_i 分解为 S_{ip}, S_{io}, S_{in} 3 个单刀开关:

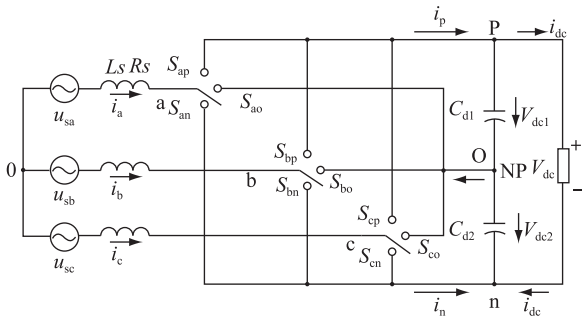


图 4 三电平逆变器主电路简化模型

Fig.4 Simplified main circuit of the three level inverter bridge

在 dq 坐标系下建立三相电压型 PWM 整流器 (VSR) 有利于实现无功电流和有功电流的解耦。三相 VSR dq 模型建立后, 对三相交流对称系统, 若只考虑交流基波分量, 则稳态时 dq 模型 dq 分量均为直流。另一方面, 适当选择同步旋转坐标系 (dq) 初始参考轴如 d 轴与电网电动势矢量 E_q 重合, 则 d 轴为有功分量参考轴, q 轴为无功分量参考轴, 从而有利于三相 VSR 网侧有功分量的解耦控制。由三相 VSR 在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型得:

$$\begin{cases} u_{gd} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q + u_d \\ u_{gq} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} u_d = -S_{dp}V_{dc1} + S_{dn}V_{dc2} \\ u_q = -S_{qp}V_{dc1} + S_{qn}V_{dc2} \end{cases} \quad (5)$$

系统的控制器采用电流内环与电压外环的双闭环控制结构, 如图 5 所示。电压外环稳定直流侧电压, 电流内环控制交流侧输入电流跟踪正弦输入电压, 采样三相电感电流, 经过 abc/dq 变换, 得到两相旋转坐标系下的有功电流 i_d 和无功电流 i_q ; 采样直流侧的输出电压, 与基准值 U_{dc}^* 进行比较, 经过 PI 调节后的输出作为有功电流 i_d 的基准值 i_d^* 。当逆变器工作在单位功率因数时, 设定无功电流的基准值 $i_q^* = 0$, i_d 和 i_q 同时经过电流环的 PI 调节, 以及

通过交叉解耦算法实现两轴电流独立控制。同时控制矢量中引入电网电压 u_{gd} 和 u_{gq} 作为前馈补偿, 使得系统的动态性能进一步提高, 最后三者相加得到两相旋转坐标系下的电压控制矢量 u_d 和 u_q 。

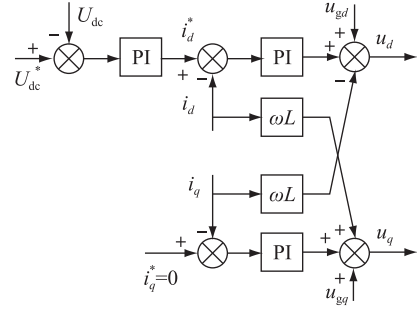


图 5 并网逆变器经典控制方法

Fig.5 Classical control method of grid-tied inverter

2 低电压零电压穿越控制

本文提出了一种两级式光伏并网逆变器低电压零电压穿越 (LVRT/ZVRT) 控制系统结构图, 如图 6 所示。

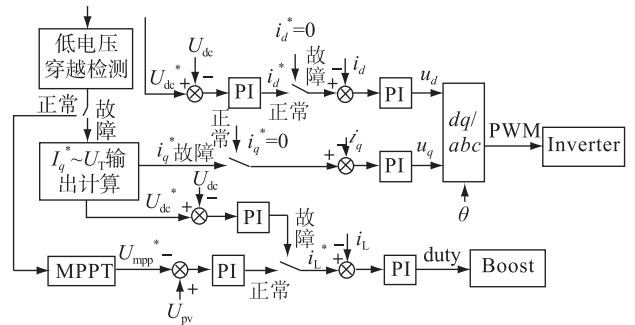


图 6 光伏系统低电压穿越控制策略

Fig.6 Control scheme of the PV system during grid voltage dips

两级式光伏发电系统拓扑如图 1 所示, 结合图 6 阐述控制过程如下:

(1) 前级最大功率点跟踪控制器采用 3 路交错并联的 Boost 对光伏阵列进行最大功率点追踪, 通过扰动观察法增大或减小光伏阵列的输出电压, 即控制 DC/DC 变换器的输入电压 U_{pv}^* , 若功率变大, 则往相同的方向增大或减小光伏阵列的输出电压; 若功率变小, 则往相反的方向增大或减小光伏阵列的输出电压。

(2) 后级 T 型三电平逆变器通过调节输出电流的大小将直流母线电压稳定在 U_{dc}^* , 表现出恒压源特性, 如图 5 所示。正常工作时直流母线电压给定 U_{dc}^* , 经闭环调节输出电流控制环 d 轴给定 i_d^* ; i_q^* 为无功电流给定, 单位功率因数时为 0; i_d^* 和 i_q^* 闭环调节后经 dq/abc 坐标变换, 经 PWM 调制后得到

DC/AC 逆变器的占空比信号。 U_{dc}^* 的取值与并网点电压 U_{ac} 相关,当逆变器调制比 $M=1$ 时, $U_{dc}^* = 1.414U_{ac}$,当调制比 $M=0.93$ 时, $U_{dc}^* = 1.52U_{ac}$,文中调制比 M 取 0.93。

(3) 低电压穿越检测需要迅速确定电网是否触发低电压穿越,通过电网电压的滑动连续窗口的有效值,以及电网电压瞬时值经过 abc/dq 坐标变换得到的幅值来进行综合判断,以保证其检测的快速性及有效性。

(4) 当检测到低电压穿越发生后,最大功率点跟踪控制器立即将控制目标由 U_{pv}^* 迅速切换为控制直流母线电压 U_{dc}^* , 后级逆变器由控制直流母线电压 U_{dc}^* 立即切换为有功电流 i_d^* 以及无功电流 i_q^* 。动态无功电流的给定 i_q^* 实时跟踪并网点正序电压 U_T 的变化,满足:

$$\begin{cases} I_q \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N (0.2 \leq U_T \leq 0.9) \\ I_q \geq 1.05 \times I_N (U_T < 0.2) \end{cases} \quad (6)$$

以零电压穿越即三相电网电压跌落至 0% 为例,零电压发生前,即在电网电压正常时,逆变器运行在光伏阵列的最大功率点上,零电压穿越发生时,由于电网电压为 0 V,导致逆变器输出功率为 0 kW,而此时最大功率点跟踪控制器仍然控制 DC/DC 变换器让光伏阵列输出最大功率,如不采取措施,DC/DC 变换器与后级 DC/AC 逆变器造成的有功不匹配会导致直流母线电压过压造成逆变器保护而脱网,甚至损坏光伏逆变器。

在这种情形下,低电压穿越控制策略将 DC/DC 变换器的控制目标由最大功率点跟踪控制切换为恒直流母线电压控制,DC/AC 逆变器由恒压源控制切换为有功电流 i_d^* 控制以及无功电流 i_q^* 控制,满足低电压穿越期间电网恢复无功支撑需求,从而解决前后级有功不匹配导致的直流母线电压升高的问题。当直流母线电压给定 U_{dc}^* 大于光伏阵列的开路电压 U_{oc} 时,DC/DC 变换器工作,当直流母线电压给定 U_{dc}^* 小于光伏阵列的开路电压 U_{oc} 时,Boost 被旁路,直流母线电压升高接近电压值 U_{oc} 。电网电压故障消除后一段时间内控制模式保持不变,有功电流给定 i_d^* 以一定速率恢复至低电压穿越前的值,无功给定为 0。最后,所有控制方式切换到发生低电压穿越前的正常工作模式,MPPT 重新投入恢复到之前的状态。

当电网电压发生不对称跌落故障即以 A 相电网电压跌落到 0% 为例,三相不对称低电压穿越控制模式和三相对称低电压穿越故障控制模式一致,低电压穿越控制策略将 DC/DC 变换器的控制目标

由最大功率点跟踪控制切换为恒直流母线电压控制,DC/AC 逆变器由恒压源控制切换为有功电流 i_d^* 控制以及无功电流 i_q^* 控制,通过电网负序电压的前馈,抵消电网负序电动势的影响,使入网电流为正序。总正负序电压为:

$$U_{dq_all} = (U_{\alpha\beta+} + U_{\alpha\beta-}) e^{-j\omega t} = U_{dq+} + U_{dq-} e^{-j2\omega t} \quad (7)$$

电网电压前馈中未经分解的 dq 分量包含了电网负序电压的前馈控制,是一两倍频于电网频率的脉动量,同样可抑制电网负序电压扰动对并网逆变器三相电流的影响。

当电网不平衡时,三相网侧的视在复功率 S 为:

$$S = P + jq = (e^{j\omega t} U_{dq}^P + e^{-j\omega t} U_{dq}^N) (e^{j\omega t} I_{dq}^P + e^{-j\omega t} I_{dq}^N) \quad (8)$$

解得:

$$\begin{cases} p(t) = p_0 + p_{c2} \cos(2\omega t) + p_{s2} \sin(2\omega t) \\ q(t) = q_0 + q_{c2} \cos(2\omega t) + q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $p_0, p_{c2}, p_{s2}, q_0, q_{c2}, q_{s2}$ 为常数,当入网电流为正序时,式(8)常数由推导可得:

$$\begin{cases} p_0 = 1.5(u_d^P i_d^P + u_q^P i_q^P) \\ p_{c2} = 1.5(u_d^N i_d^P + u_q^N i_q^P) \\ p_{s2} = 1.5(u_q^N i_d^P - u_d^N i_q^P) \\ q_0 = 1.5(u_q^P i_d^P - u_d^P i_q^P) \\ q_{c2} = 1.5(u_q^N i_d^P - u_d^N i_q^P) \\ q_{s2} = 1.5(-u_d^N i_d^P - u_q^N i_q^P) \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)、(10)表明,当三相不对称故障时,有功功率存在着 2 倍频波动,直流母线电容电压因有功的波动存在着二次谐波分量,当对直流母线电压的控制性能要求不高时,可以不用对 p_{c2}, p_{s2} 抑制。

3 仿真实验

3.1 算法参数说明

文中基于 Matlab 仿真平台对光伏电站并网点三相对称短路故障、单相短路故障进行了仿真研究,对所提出的 LVRT/ZVRT 策略的可行性与正确性进行验证,如图 7 所示。被测机器容量为 40 kW,通过 0.48 kV/10 kV 变压器并入 10 kV 电网,光伏阵列 MPPT 点电压 600 V。

3.2 对称故障

在 0.5 s 时 10 kV 母线发生三相对称短路至 0 p.u.故障,短路故障时间持续 0.15 s,在 0.65 s 时故障切除,系统恢复正常运行。光伏逆变器在故障前以额定功率运行,功率因数为 1。

在电压发生跌落后,Boost 控制器检测到低电压

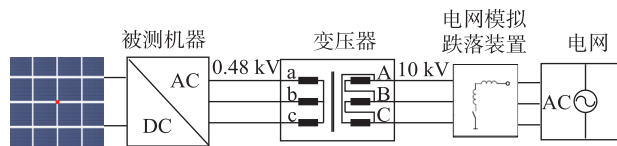


图7 光伏并网系统仿真结构

Fig.7 Simulation topology of the PV system

穿越发生,退出正常 MPPT 工作模式,切换为故障穿越模式,控制直流母线电压恒定;后级逆变器转为 PQ 控制模式,向电网注入无功功率来支撑电网电压,使电压与电流的相位差发生了显著变化,如图 8 所示。

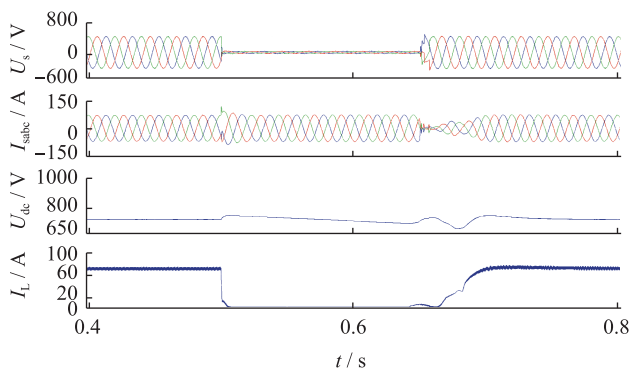


图8 三相对称跌落零电压穿越仿真波形

Fig.8 The simulation waveform of three-phase asymmetric zero voltage ride through

3.3 不对称故障

在电压发生跌落,不对称故障包括单相短路接地故障、两相短路接地故障和两相短路故障。以两相短路故障为例进行分析。

在 0.5 s 时 10 kV 母线发生 A、B 两相短路故障,短路故障持续时间为 0.15 s。低压侧 b 相跌至 0 p.u., a 相、c 相电压幅值略有下降。为了维持并网点电压,需要光伏逆变器根据并网点正序分量值输出一定的无功功率,此时逆变器的输出电压与电流出现相位差,发生不对称故障,注入电网的电流会出现负序分量,通过相关控制消除负序分量,使得三相并网电流在故障期间仍保持平衡,如图 9 所示。由于后级逆变器存在着有功功率的 2 倍频波动,因此相应的 Boost 输出电压与输出电流也存在着 2 倍频波动。由于 Boost 处于大信号稳定域内且电感电流受控,因此系统始终是稳定的。

4 试验研究

为验证所提出的两级式光伏逆变器低电压零电压穿越控制策略,设计了一套 40 kW 光伏并网逆变系统,实验平台如图 10 所示。直流侧采用 PV 模拟器模拟光伏电池,交流侧采用电网模拟器进行电

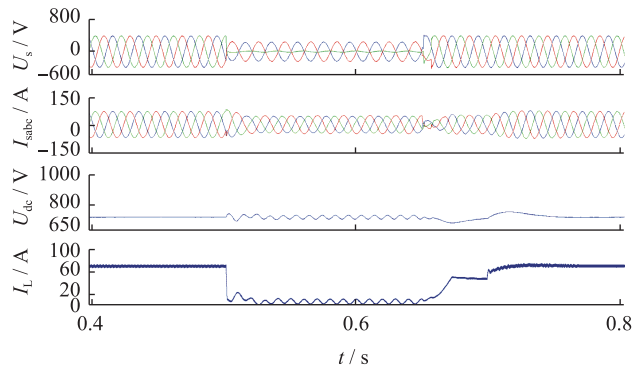


图9 三相不对称跌落零电压穿越仿真波形

Fig.9 The simulation waveform of three-phase asymmet

网电压跌落,变压器原边 A/B/C 三相电压同时跌落对应于副边 a/b/c 电压同时跌落,变压器原边两相电压同时跌落对应于副边单相电压跌落,逆变器主要参数如表 1 所示。

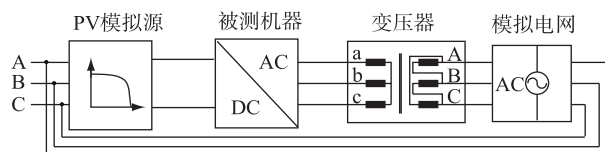


图10 光伏低电压穿越实验平台

Fig.10 Experiment platform of the PV system for LVRT

表1 逆变器参数

Table 1 System parameters of the experiment

逆变器参数	参数值
额定输出功率/kW	40
额定网侧电压/Vac	480
MPPT 电压范围/V	200~850
MPPT 路数/个	3
直流母线电压/V	730
功率器件开关频率/kHz	16

4.1 三相对称故障

为了研究 LVRT 控制策略效果,选取如下最严酷的工况条件:光伏逆变器满载,光伏模拟器开路电压 711 V,在 t_1 时刻发生三相短路故障,电网电压跌落到 0 p.u.,故障时间持续 150 ms, t_2 时刻电网恢复后恢复到正常值,实验波形如图 11 所示。图 11 显示了直流母线电压和 Boost 开关管两端电压、电网 A 相电压和 A 相电流。

当三相电网电压跌落接近 0 附近时,由于采样精度与误差等原因,锁相环输出会在故障时间内发生较大偏移,文中基于双同步坐标系的解耦锁相环算法,根据电压跌落深度设置一个可变参数的滤波器环节,当跌落至零附近时采用较大滤波器保持输出频率基本不变,当故障消除后采用较小滤波器使

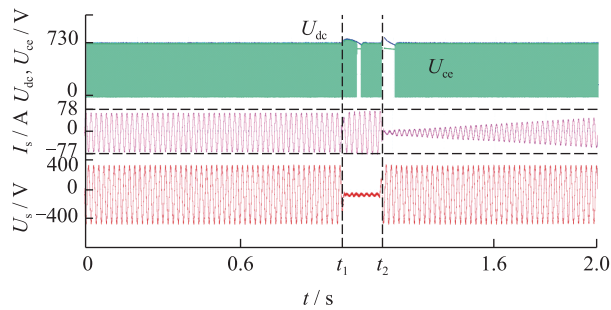


图 11 三相对称跌落零电压穿越实验波形

Fig.11 The experimental waveform of three-phase symmetrical zero voltage ride through

锁相环迅速跟踪电网相位。

在 t_1 时刻发生三相短路 0 电压故障时, 前级 Boost 退出最大功率点追踪, 控制目标切换为控制直流母线电压恒定; 同时后级逆变器控制目标由控制直流母线电压恒定切换为 PQ 控制, 有功给定为 0, 无功电流给定为 1.05 倍的额定电流。 t_2 时刻电网恢复后, 无功电流给定为 0, 有功电流给定从 0 以设置速率恢复到低电压穿越前的值。由图 11 可以看出, 直流母线电压 U_{dc} 在电网电压 U_g 跌落和恢复瞬间略有波动, 当直流母线电压大于 780 V 时 Boost 关闭, 当直流母线电压小于 730 V 时 Boost 开通并将直流母线电压稳定在 730 V。并网电流 I_s 暂态过程无超调, 且穿越期间提供无功电流 (并网电流超前电网电压相位 90°) 用以支撑电网电压恢复。故障消除后一段时间内控制模式保持不变, 有功电流从 0 以设置速率恢复至低电压穿越前的水平, 在有功功率增加过程中, 光伏输出电压逐渐从开路电压降低至 MPP 点电压, 当直流母线电压低于 730 V 时 Boost 重新投入并将直流母线电压稳定至 730 V。最后, 控制模式切换为正常工作模式, MPPT 功能重新投入, 低电压穿越结束。

4.2 三相不对称故障

为研究不对称故障下 LVRT 控制策略的效果, 选取故障最为极端的情况进行实验研究: 光伏逆变器满载, 光伏模拟源开路电压 (711 V) 小于直流母线电压, 在 t_1 时刻发生三相不对称故障, 电网电压跌落到 0 p.u., 故障时间持续 150 ms, t_2 时刻电网恢复后电网电压直接恢复到正常值。实验波形如图 12 所示。图 12 显示了直流母线电压 U_{dc} 和 Boost 开关管两端电压 U_{cc} 、电网 A 相相电压和 A 相电流。

当 t_1 时刻发生不对称故障时, 光伏逆变器前级 Boost 退出最大功率点跟踪, 控制目标切换为控制直流母线电压恒定。故障期间, 由于后级逆变器要发出正序有功电流与正序无功电流, 因此直流母线电

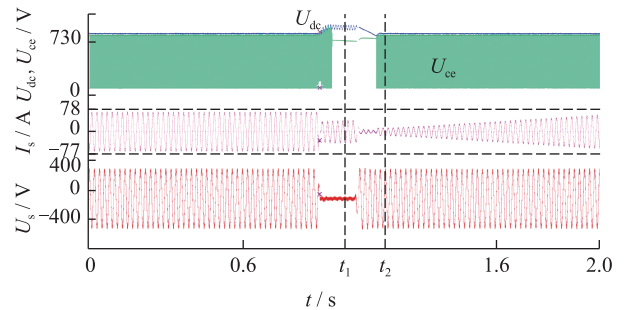


图 12 三相不对称跌落零电压穿越实验波形

Fig.12 The experimental waveform of three-phase asymmetric zero voltage ride through

压含有 2 倍频波动。 t_2 时刻电网恢复, 无功电流给定为 0, 有功电流给定从 0 以一个设置速率恢复到低电压穿越前的值。由图 12 可以看出, 直流母线电压 U_{dc} 在进入低电压穿越瞬间升高至 780 V 后 Boost 关闭, 直流母线电压含有 2 倍频的波动, 反映出有功电流的 2 倍频波动。并网电流 I_s 在电网电压跌落瞬间以及电网电压恢复瞬间等暂态过程无超调, 穿越期间提供无功电流支撑电网恢复。故障消除后一段时间内控制模式保持不变, 有功电流同样从 0 以一个设置速率恢复至低电压穿越前的水平, 在有功功率增加过程中, 光伏输出电压逐渐从开路电压降低至 MPP 点电压, 当直流母线电压低于 730 V 时 Boost 重新投入并将直流母线电压稳定至 730 V。最后, 控制模式切换为正常工作模式, MPPT 功能重新投入, 低电压穿越结束。

5 结语

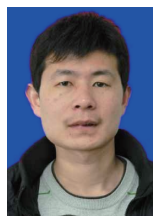
中功率两级式光伏并网逆变器越来越多的应用于地面大型光伏电站, 基于文中提出的两级式光伏逆变器低电压穿越控制方式能有效的进行低电压穿越, 低电压穿越过程以及恢复过程对电网系统无冲击, 在新能源并网渗透率越来越高的背景下采用文中提出的方法可以有效的降低电网系统风险, 提高电网的稳定性, 但本文还有些不足, Boost 虽然在大信号扰动下保持了较好的稳定性, 但是减小了系统的动态响应速度, 值得进一步研究。

参考文献:

- [1] GB/T 19964—2012 光伏发电站接入电力系统技术规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
GB/T 19964—2012 Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system [S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [2] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2014(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power

- system [J]. *Power System Protection and Control*, 2014(11): 28-33.
- [3] LIN C M, YOUNG C M, YEH W S, et al. An LVRT control strategy for reducing DC-link voltage fluctuation of a two-stage photovoltaic multilevel inverter[C]// *IEEE, International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. IEEE, 2013: 908-913.
- [4] YANG F, YANG L, MA X. An advanced control strategy of PV system for low-voltage ride-through capability enhancement[J]. *Solar Energy*, 2014, 109:24-35.
- [5] 杨新华, 汪龙伟, 吴丽珍, 等. 可降低母线电压波动的两级式光伏发电系统低电压穿越策略[J]. *可再生能源*, 2015, 33(6):827-833.
YANG Xinhua, WANG Longwei, WU Lizhen, et al. Double-stage PV power system LVRT strategy with ability of reducing voltage fluctuation of DC bus [J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(6): 827-833.
- [6] 辛 凯, 郭海滨, 高拥兵. 一种多机并网功率变换器低电压穿越控制系统及方法[P]. 广东: CN105098832A, 2015.
XIN Kai, GUO Haibin, GAO Yongbin. A LVRT control system and method for a multi-machine parallel power converter [P]. Guangdong: CN105098832A, 2015.
- [7] 侯世英, 殷忠宁, 罗书豪, 等. 光伏电池输出电压的稳定性分析[J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(5):7-12.
HOU Shiyong, YIN Zhongning, LUO Shuhao, et al. Stability analysis of photovoltaic cells output voltage [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(5):7-12.
- [8] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2005, 20(4): 963-973.
- [9] KULAWIK M. Stability analysis of boost converter with nonlinear feedback[C]// *Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 2015:370-377.
- [10] REDL R, NOVAK I. Stability analysis of constant-frequency current-mode controlled switching regulators operating above 50% duty ratio [C] // *Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 1982:213-223.
- [11] REDL R, NOVAK I. Instabilities in current-mode controlled switching voltage regulators[J]. 1981:17-28.
- [12] ERICKSON R W, CUK S, MIDDLEBROOK R D. Large-signal modelling and analysis of switching regulators[C]// *Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 1982:240-250.
- [13] 沈 宏, 赵可斌. 具有良好动态响应特性的 Boost 变流器控制[J]. *上海交通大学学报*, 1994(3):72-79.
SHEN Hong, ZHAO Kebin. A new control method for boost converter with the characteristics of well-behaved dynamic response [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1994(3):72-79.

作者简介:



郭 勇

郭 勇(1984—),男,江苏南京人,硕士,研究方向为电力电子变流技术、新能源及分布式发电技术(E-mail:guoy@nrec.com);

李 勇(1981—),男,江苏南京人,博士,研究方向为新能源发电与电网接入、交直流微电网、新能源汽车的电力推进以及高压变频器技术(E-mail:liyong@nrec.com);

皇甫星星(1989—),男,江苏南京人,硕士,研究方向为电力电子变流技术、新能源及分布式发电技术(E-mail:huangfxx@nrec.com);

丁 勇(1981—),男,江苏南京人,高级工程师,研究方向为电力电子变流技术、柔性交流输电技术(E-mail:dying@nrec.com);

石祥建(1980—),男,江苏南京人,高级工程师,研究方向为工业控制自动化研究、电力电子电力在系统中的应用研究(E-mail:shixj@nrec.cn);

刘为群(1966—),男,江苏南京人,高级工程师,研究方向为发电机励磁及电力电子应用研究(E-mail:liuweiqun@nrec.cn)。

LVRT Control Strategy of Two-stage PV Power System

GUO Yong, LI Yong, HUANGFU Xingxing, DING Yong, SHI Xiangjian, LIU Weiqun

(NR Electric Corporation, Nanjing 211102, China)

Abstract: With the application of two-stage PV grid-tie inverter in the large-scale and medium power systems, it is widely researched that the LVRT control strategy of photovoltaic inverter based on the two power stages topology. Compared with single-stage PV inverter, it is a combination of the first power stage of DC/DC converter and the second power stage of DC/AC inverter for two-stage PV inverter. The control is more complex and it is more difficult in the low voltage ride through. Firstly, the system modeling is carried on and then the control strategy is proposed based on control mode seamless switching in LVRT. At the steady state the DC/DC conversion unit tracks the maximum power point and the DC/AC inverter unit works as a constant voltage source. In LVRT, the DC/DC conversion unit runs in the constant busbar voltage mode and DC/AC inverter unit runs in the p-q mode. The problem is resolved that the DC bus over-voltage caused by unbalanced energy between the DC/DC unit and DC/AC unit. The experiments in a 40 kW PV grid-tie inverter of two power stage verify the correctness and feasibility of the theoretical analysis finally.

Key words: two-stage PV power generation system; LVRT; control mode seamless switching

(编辑 徐林菊)