

基于改进型电网电压前馈的光伏电站 低电压穿越控制策略

顾浩瀚,蔡旭,李征

(上海交通大学 风力发电研究中心,上海 200240)

摘要: 针对三相并网光伏发电系统的低电压穿越问题,提出一种基于全电压前馈的改进型电网电压前馈控制策略。在建立三相并网光伏发电系统数学模型的基础上,推导出控制回路中前馈项的具体表达式,将电网电压通过该前馈项反馈到控制环路中,所构成的整体控制方案能明显降低电网电压突变对系统并网电流的影响程度,从而改善低电压穿越期间的过电流和谐波问题。在基于实时数字仿真仪搭建的硬件在环平台上对该策略进行了验证,通过与传统控制方法的对比证明了其在改善并网电流方面的可行性与有效性。

关键词: 并网光伏发电系统; 全电压前馈; 低电压穿越; dq 变换; 修正因子; 谐波抑制

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.003

0 引言

传统化石能源的日益枯竭及其造成的环境污染使得新能源发电成为近几年的研究热点。无论是光伏发电还是风力发电,由于其本身的间歇性、不确定性等特点,可能会对电网安全稳定运行造成影响,并且影响的程度会随着其并网规模的增大而加深。因此,电网对大中型光伏电站的低电压耐受能力提出了要求,要求其具备一定的低电压穿越(LVRT)能力,避免在电网电压跌落时脱离,从而造成不良影响。

目前,关于光伏电站 LVRT 控制策略的研究主要分为 2 类。第一类是采用电流限幅措施,使电网电压跌落期间光伏电站的并网电流不过流。这种限幅通常是通过设定 LVRT 期间有功和无功电流的参考值来实现,文献[1-3]即采用此种方法;或者单纯依靠逆变器的输出限幅作用,对逆变器的过流抑制和耐受能力进行不断改进优化,这是目前光伏工程中常采用的 LVRT 控制策略,如文献[4]采用模仿风机 Crowbar 电路^[5-6]的方法来限制直流母线电压在穿越期间增大的幅度,而逆变器输出电流则依靠其本身的限幅作用。设定有功、无功电流的参考值对于瞬态过电流的抑制效果不佳,并且由于功率平衡的原则,有功电流的限制有一定范围,不一定能完全跟踪给定的参考指令;而利用逆变器本身的限幅作用或者加装其他限幅环节则可能造成过多的软硬件资源投入,导致成本显著提升。第二类是采用电压前馈的控制策略。文献[7]提出一种电压不平衡条件下的快速软

件锁相技术,但其采用的前馈策略是直接将电网电压前馈到内环电流调节器之后,与正常状态下的系统前馈解耦控制方法相近,并且电压跌落深度仅设定为 20%,其实际效果及可靠性有待进一步研究;文献[8]采用的前馈策略是在电压前馈回路中加入比例环节,电网的扰动对电流的影响仍比较明显,包括会在 LVRT 期间产生谐波等;文献[9]将电网电压扰动通过传递函数反馈到母线电压调节器的输出上,更好地抑制了母线电压的升高,但其未将关注点放在并网电流上。

除此之外,文献[10]提出的基于超级电容储能方案硬件投入比较大,工程实现也有难度;文献[11]采用的基于模型电流预测的方案主要关注的是穿越期间光伏电站对并网点电压的支撑,对于电流问题仍然依靠逆变器的输出限幅作用。

文献[12-14]针对 LCL 型并网逆变器的控制问题提出了一种全电压前馈的方案,其能有效抑制电网电压变化可能会对并网电流造成的不良影响。应用这种思想,本文提出一种基于改进型电网电压前馈的三相并网光伏发电系统 LVRT 控制策略,该方案能有效改善穿越期间的过电流问题,同时抑制电网谐波对并网电流的影响,保证电流的波形质量,并且不影响光伏电站对电网进行无功支撑。此方案只需在控制算法上进行相应改进,不需要增加额外的硬件设备,对传统限幅策略和电压前馈策略实现了优化,且易于工程实施,对逆变器本身的过流抑制与耐受性能未提出额外的要求。

1 光伏电站 LVRT 技术标准

关于大中型光伏电站的 LVRT 能力的要求,国家电网公司出台的《光伏电站接入电网技术规定》中有明确的阐释,其曲线如图 1 所示。图中,光伏电站

收稿日期:2016-06-23;修回日期:2017-02-17

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2013BAA01B04);上海市科学技术委员会重点科技专项(11dz1210401)

Project supported by the Scientific and Technical Supporting Program of China(2013BAA01B04) and the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality(11dz1210401)

并网点电压为标么值。

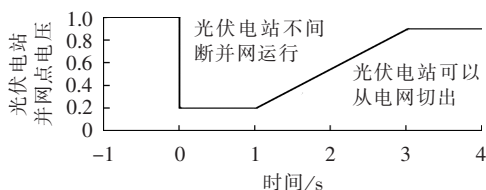


图 1 大中型光伏电站低电压穿越能力要求
Fig.1 Required LVRT capability of large- or mid-sized PV station

LVRT 具体要求为:光伏电站并网点电压全部在图 1 轮廓线及其以上的区域内时,光伏电站应能保持不间断并网运行,否则可以从电网切出;并网点电压跌落至标称电压的 20% 时,光伏电站能保持不间断并网运行 1 s;并网点电压在发生跌落 3 s 内能恢复到标称值的 90% 时,光伏电站应能保持不间断并网运行。

2 改进型电网电压前馈控制策略

采用电网电压前馈控制能补偿电网电压变化对系统可能造成的影响,但是在电网电压出现大幅度跌落时采用传统的直接前馈方式不能较好地抑制过电流冲击以及电流谐波,所以需要针对具体系统的数学模型来分析电压前馈的改进方法。本节从并网光伏发电系统的结构出发,推导出系统的数学模型,并给出改进型前馈控制策略的控制框图以及前馈项的传递函数。

2.1 三相并网光伏发电系统的数学模型

三相并网光伏发电系统的结构有很多种,本文采用较常见的一种,其具体结构如图 2 所示。

由图 2 可知,系统采用的是两级式隔离型结构,光伏阵列输出的直流先经过 Boost 升压变换器再进入第二级逆变器转化为交流,最后通过 LC 滤波环节和变压器并入电网。Boost 电路实现升高电压和 MPPT 的功能,逆变器则实现并网电流的控制。

下面分析推导这种结构下光伏发电系统的数学模型,由于本文研究集中在并网逆变器上,所以给出如图 3 所示的并网逆变器主电路。

由图 3 可知,并网逆变器采用三相两电平拓扑结构,其简化了变压器部分,并用电阻 R 表征并网线路的阻抗。

首先,推导 abc 三相静止坐标系下光伏发电系

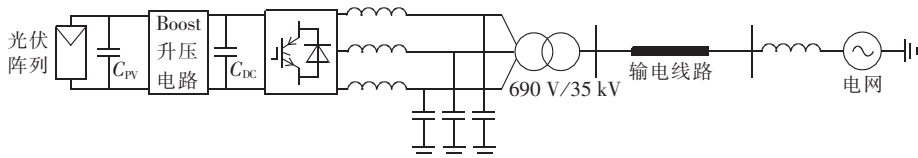


图 2 三相并网光伏发电系统结构

Fig.2 Configuration of grid-connected three-phase PV power generation system

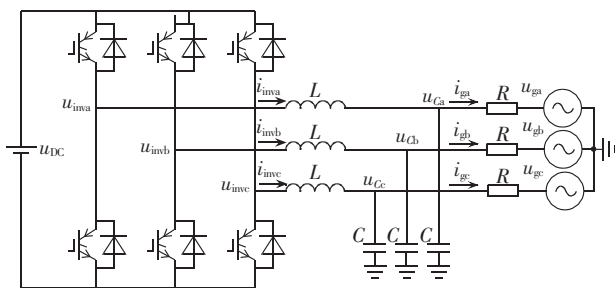


图 3 并网逆变器主电路

Fig.3 Main circuit of grid-connected inverter

统的数学模型,其应用基尔霍夫电压电流定律,并将电感电容等元件用 s 域中的形式表达,可得如下 3 个方程组:

$$\begin{bmatrix} u_{inva} \\ u_{invb} \\ u_{invc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{Ca} \\ u_{Cb} \\ u_{Cc} \end{bmatrix} = sL \begin{bmatrix} i_{inva} \\ i_{invb} \\ i_{invc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{Ca} \\ u_{Cb} \\ u_{Cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{inva} \\ i_{invb} \\ i_{invc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = sC \begin{bmatrix} u_{Ca} \\ u_{Cb} \\ u_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, u_{inva} 、 u_{invb} 、 u_{invc} 为逆变器桥臂中点电压; u_{Ca} 、 u_{Cb} 、 u_{Cc} 为滤波电容电压; u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为三相电网(逆变器并网点)电压; i_{inva} 、 i_{invb} 、 i_{invc} 为逆变器输出的三相电流; i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 为输入电网电流; L 和 C 分别为逆变器输出滤波环节的电感和电容值。上述所有的电压和电流均为瞬时值。

一般地,在 abc 静止坐标系下研究三相并网系统的控制是不太方便的,通常需要在 dq 旋转坐标系下展开讨论。将旋转坐标系的 d 轴按电网电压矢量定向,且 d 轴滞后 q 轴 90° ,则得到 2 个坐标系之间的转换关系如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, X 代指电压或者电流; $\theta = \omega t$ 为 d 轴与 a 轴之间的夹角; ω 为 d 轴旋转的角速度,即三相电网电压矢量旋转的角速度。根据式(4)对方程组(1)~(3)进行变换得到 dq 坐标系下的三相并网光伏发电系

统数学模型如下:

$$\begin{bmatrix} u_{invd} \\ u_{invq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} s & -\omega \\ \omega & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{invd} \\ i_{invq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_{invd} \\ i_{invq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} s & -\omega \\ \omega & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

对方程组(5)~(7)进行化简,得到光伏发电系统最终的数学模型如下:

$$\begin{cases} u_{invd} = u_{Cd} + sLi_{invd} - \omega Li_{invq} \\ u_{invq} = u_{Cq} + sLi_{invq} + \omega Li_{invd} \\ i_{invd} = i_{gd} + sCu_{Cd} - \omega Cu_{Cq} \\ i_{invq} = i_{gq} + sCu_{Cq} + \omega Cu_{Cd} \\ u_{Cd} = u_{gd} + Ri_{gd} \\ u_{Cq} = u_{gq} + Ri_{gq} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)所示的数学模型可知,旋转坐标系下电压和电流的方程式中都存在 d 轴和 q 轴物理量,故其是相互影响的。

2.2 前馈控制策略的推导

光伏发电系统在正常工作的情况下,采用逆变器双环控制的策略。外环控制直流母线电压;给定电网内环的参考值,即内环对并网电流进行控制。

针对 LVRT,其期望的结果是并网电流尽可能不受电网电压跌落的影响,因此本文引入电网电压前馈控制。将电网电压通过传递函数 T_{F1} 、 T_{F3} 和 T_{F2} 、 T_{F4} 分别引入到内环电流调节器之前和之后,通过推导出 2 个传递函数的具体表达式以期消除电网电压扰动对并网电流的影响,实现优化 LVRT 期间过电流问题以及电流质量的目的。根据上文推导出的系统数学模型,得到其控制框图如图 4 所示,图中只给出了电流内环的部分。

图 4 中, i_{invd}^* 、 i_{invq}^* 分别为 d 、 q 轴电流的参考值。当开关频率足够高时,逆变器的放大特性可由比例增益 K_{PWM} 近似表示^[15]。对于使用正弦脉宽调制(SPWM)方法的逆变器通常取 $K_{PWM} = U_{DC}/U_{tri}$,其中 U_{DC} 为直流母线电压值, U_{tri} 为三角载波的幅值。图中的 C_{F1} 、 C_{F2}

为前馈项的修正因子,对由于物理量的参考方向和 K_{PWM} 的近似性等原因造成的不确定性和误差进行修正,以达到更好的结果。

根据控制框图,对于图 4 中的 d 轴分支可列出如下方程组:

$$\begin{cases} u_{invd} = \left[(i_{invd}^* - i_{invd} + T_{F1}u_{gd}) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) + T_{F2}C_{F1}u_{gd} \right] K_{PWM} \\ i_{invd} = (u_{invd} - u_{Cd} + \omega Li_{invq}) \frac{1}{sL} \\ u_{Cd} = (i_{invd} - i_{gd} + \omega Cu_{Cq}) \frac{1}{sC} \\ i_{gd} = (u_{Cd} - u_{gd}) \frac{1}{R} \end{cases} \quad (9)$$

对方程组(9)进行化简,得到并网电流 d 轴分量关于电网电压的表达式。为了表述方便,并使结果表达式更清晰,令:

$$e = K_p K_{PWM} + \frac{K_i}{s} K_{PWM} \quad (10)$$

$$f = sCL\omega i_{invq} - \omega Cu_{Cq} \quad (11)$$

$$g = -\omega Li_{invq} (s^2CL + 1 + sCe) - sCL\omega u_{Cq} (s^2CL + 1 + sCe) \quad (12)$$

最终化简结果如下:

$$\begin{aligned} & i_{invd}^* e (s^2CL + 1) + u_{gd} [T_{F2}C_{F1}K_{PWM} (s^2CL + 1) - \\ & (s^2CL + 1) (s^2CL + 1 + sCe) + T_{F1}e (s^2CL + 1)] - fe = \\ & i_{gd} [sL (s^2CL + 1 + sCe) + R (s^2CL + 1) \times \\ & (s^2CL + 1 + sCe) + e] + g \end{aligned} \quad (13)$$

分析式(13), e 可以视为常量, f 、 g 与 i_{invq} 和 u_{Cq} 有关,所以影响 i_{gd} 的物理量共有 4 个,是 i_{invd}^* 、 u_{gd} 、 i_{invq} 和 u_{Cq} 。要保证 i_{gd} 不受电网电压跌落的影响,即需要满足 u_{gd} 的系数为 0。其中 i_{invq} 需向电网提供无功支撑且在 q 轴分支中会抑制电网电压对其的影响,可以不考虑; u_{Cq} 与 u_{gq} 有关,按照 d 轴与电网电压矢量重合的定向方法, u_{gq} 应保持为 0,当然在电压跌落过程中 u_{gq} 肯定会有波动,其变化的幅度受锁相环技术的

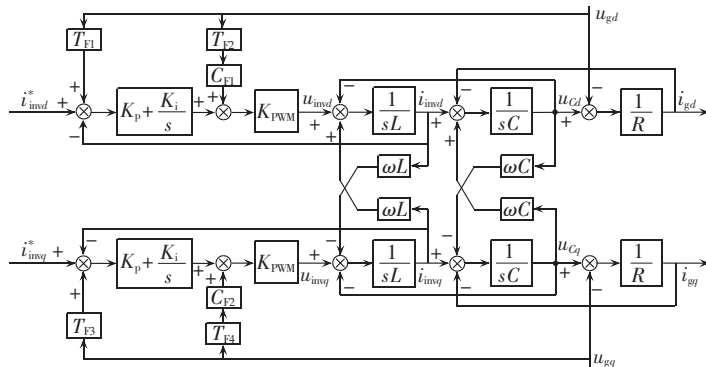


图 4 改进型电网电压前馈控制框图

Fig.4 Block diagram of improved grid-voltage feed-forward control

影响,不在本文的讨论范围内,可以忽略,并且不会明显影响控制策略的效果。令:

$$T_{F2}C_{F1}K_{PWM}(s^2CL+1)-(s^2CL+1)\times (s^2CL+1+sCe)+T_{F1}e(s^2CL+1)=0 \quad (14)$$

推导可得:

$$T_{F2}C_{F1}K_{PWM}-(s^2CL+1)-sCe+T_{F1}e=0 \quad (15)$$

最终可得:

$$\begin{cases} T_{F1}=sC \\ T_{F2}C_{F1}=\frac{s^2CL+1}{K_{PWM}} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中,可将 $T_{F2}C_{F1}$ 视为一个整体,再具体修正 C_{F1} 的值即可。通过这种前馈控制策略,可以明显抑制电网电压波动对并网电流的影响,使其仅与给定的参考值 i_{invd}^* 有关,从而实现 LVRT。同样的推导过程应用于 q 轴分支得到的结果是一样的。即:

$$\begin{cases} T_{F3}=sC \\ T_{F4}C_{F2}=\frac{s^2CL+1}{K_{PWM}} \end{cases} \quad (17)$$

需要指出的是,当采用改进型前馈控制方法时,并网电流不会受到电网电压的影响,但仍然要受到参考值的影响。如果在 LVRT 期间仍沿用上文提到的双环控制策略,则在电压跌落期间直流母线电压会波动,从而造成内环电流的给定值波动,同样无法保证过电流的抑制和电流的波形质量。在实际应用中,当检测到电网电压跌落时,首先要断开电压外环,并给定内环电流的参考值,从而变成单环控制。这一点和常用的给定有功电流参考值的方法相同,但由于其受到电网电压的影响,传统的方法不能达到很好的控制效果。

LVRT 期间,逆变器输出的电流应限制其不能超过额定电流的 1.1 倍^[11],即:

$$\sqrt{i_{invd}^2+i_{invq}^2} \leq 1.1 i_N \quad (18)$$

LVRT 期间无功电流的参考值需根据无功支撑的相关要求给定,而有功电流的参考值按正常工作状态的有功电流值给定,或者比常态值略微小一点,如常态值的 80%~90%。

3 硬件在环平台实时仿真验证

为了验证上述改进型电网电压前馈控制策略的有效性,基于实时数字仿真仪 RTDS(Real-Time Digital Simulator)搭建了硬件在环(HIL)仿真平台,并对提出的控制策略进行了纯数字仿真以及基于 HIL 平台的仿真。光伏电站采用集中式并网方式,系统结构及变压器变比如图 2 所示。

3.1 HIL 实时仿真平台概述

基于 RTDS 的 HIL 实时仿真平台架构如图 5 所示。将并网光伏系统主电路模型搭建于 RTDS 的配

套软件 RSCAD 中,RTDS 通过 GTAO 板卡输出电压、并网电流等模拟信号至主控制器,再由主控制器执行相关算法生成 PWM 脉冲驱动信号并通过 GTDI 板卡送回至主电路从而能够完成对逆变器的控制。主控制器是基于 TMS320F28335 DSP 芯片搭建而成的。

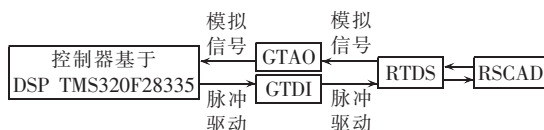


图 5 基于 RTDS 的 HIL 仿真平台架构

Fig.5 Structure of HIL simulation platform based on RTDS

上述 HIL 平台包含实际的控制器,并且兼具 RTDS 仿真的实时性^[16],故其仿真结果比较贴合实际情况,有较高的参考价值。

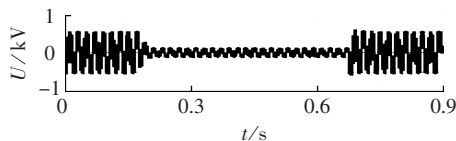
3.2 RTDS 数字仿真结果

首先进行 RTDS 纯数字仿真,设定系统在 0.2 s 时发生三相短路故障,三相电网电压对称跌落至约 25% 额定电压,即跌落深度为 75% 额定电压,0.7 s 时切除系统故障,电网电压恢复正常,整个 LVRT 过程历时 0.5 s。

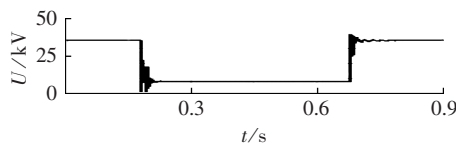
采用改进型电网电压前馈控制策略时,按照上文阐述的单环控制方法,穿越期间给定有功、无功电流参考值 $i_{invd}^*=-0.65$ kA、 $i_{invq}^*=0.10$ kA,给定修正因子 $C_{F1}=C_{F2}=-0.9$ 。关于物理量中出现的负号,是由于 RTDS 模型对方向的一些限制,若电流由逆变器流向电网电流方向则为负,所以有功电流和修正因子均为负值。

为了说明本文所提控制策略的有效性,将其与传统限幅控制策略作对比,此处采用的限幅策略是上文提到的给定有功、无功电流参考值的方法,不利用硬件上的限幅功能,目的是从控制策略本身展示出采用改进型电压前馈方法的优势。

图 6 为电网电压发生三相对称跌落时的波形,



(a) 对称故障下变压器逆变器侧单相并网电压波形



(b) 对称故障下变压器网侧三相电压有功分量波形

图 6 对称故障下的并网点电压波形

Fig.6 Voltage waveforms of grid-connection point with symmetrical fault

其中图 6(a)是对称故障下变压器逆变器侧的单相并网电压波形,图 6(b)是对称故障下变压器网侧的三相电压有功分量的波形。

图 7 为 2 种控制策略下并网电流波形的对比,为了达到较好的控制效果,将传统限幅策略的有功电流参考值设定为 -0.55 kA,比改进型前馈策略的参考值小,即理想状况下其过电流抑制效果应该更好。但从图 7(a)和(b)中可以看出,改进型前馈策略下并网电流在 LVRT 期间几乎和故障前保持一致,在电网电压跌落的瞬间达到幅值最大值 0.629 kA,正常工作状态下的幅值为 0.595 kA,故其满足不超过额定值 1.1 倍的要求,然后跟随参考值逐渐变小趋近额定值;而传统限幅策略下并网电流幅值最大值达到 0.836 kA,在整个 LVRT 期间电流幅值明显大于额定值,所以在实际应用中常将电流参考值设定在更小的范围内,或者通过逆变器的限幅作用处理过电流问题。图 7(c)展示的是 2 种控制策略下有功电流幅值变化的对比情况。在故障发生瞬间,从图中圆圈标注的地方可看出传统限幅策略下有功电流存在比较明显的过冲现象,受功率平衡原则的约束单纯地给定电流参考值进行限制过电流并不能达到较为理想的效果;而改进型前馈策略下的有功电流变化

则比较平缓,对整个发电系统以及电网的冲击更小,满足预期要求。

对 2 种策略下并网电流 a 相的谐波情况进行监测,主要针对 2、3 次谐波。得到的结果是,改进型前馈策略下电流在故障发生瞬间的 2、3 次谐波幅值达到峰值,分别为 0.0305 kA 和 0.0176 kA;传统限幅策略下相对应的值为 0.0821 kA 和 0.0433 kA。无论是从绝对值还是谐波所占的比例来看,改进型前馈策略对谐波的抑制效果更加明显。综上所述,相比于传统限幅策略,改进型电网电压前馈控制策略在电网电压发生三相对称故障的情况下能顺利使系统实现 LVRT,且在过电流以及谐波抑制问题上展示出更优良的性能。

需要指出的是,由功率平衡原则可知,并网电流的减小必然会引起直流母线电压的升高^[17-18],所以在实际应用中,无论是采用本文提出的改进型前馈策略还是传统限幅策略,均可采用给直流母线电容并联卸荷电阻^[18-19]的方法目的是防止直流母线电压过度升高。所以对于过电流的抑制并不能使其无限小,而需要在抑制过电流和直流母线电压升高之间找到平衡点。

3.3 HIL 平台验证结果

在 HIL 实时仿真平台上对所提的控制策略进行验证,系统参数如下:光伏发电系统额定容量为 0.5 MW,交流电网线电压为 35 kV,交流电网频率为 50 Hz,滤波器电感为 1.5 mH,滤波器电容为 4.2 μ F,直流母线电压为 1.5 kV,直流母线电容为 8000 μ F。LVRT 过程的发生时刻及持续时间、电压跌落深度与 3.2 节数字仿真一致。

由于实际控制器中存在数据采样与转换等问题,故其与纯数字仿真存在一定的偏差,HIL 仿真稳态情况下直流母线电压最终稳定在 1.48 kV 附近,并网电流则比数字仿真略微偏大。因此对 LVRT 期间的有功电流参考值进行了相应调整,设置改进型电网电压前馈策略和传统限幅策略的电流参考值相同,即 $i_{invd}^* = -0.6$ kA, $i_{invq}^* = 0.1$ kA,设置改进型前馈策略的修正因子 $C_{F1} = C_{F2} = -0.9$ 。

改进型电网电压前馈控制策略的 HIL 仿真结果如图 8 所示。由图 8(a)—(c)可以看出,在改进型电网电压前馈控制策略的作用下,光伏系统的单相和三相并网电流在 LVRT 期间几乎和故障前保持一致,在进入 LVRT 过程的瞬间变化平缓,无明显过电流情况发生,顺利实现了 LVRT。电压跌落瞬间 a 相电流幅值达到最大值 0.636 kA,其稳态幅值为 0.608 kA,满足 LVRT 要求;而传统限幅策略下 a 相电流幅值在电压跌落瞬间达到最大值 0.677 kA,结果表明了改进型电压前馈策略的优势。图 8(d)展示了 2 种

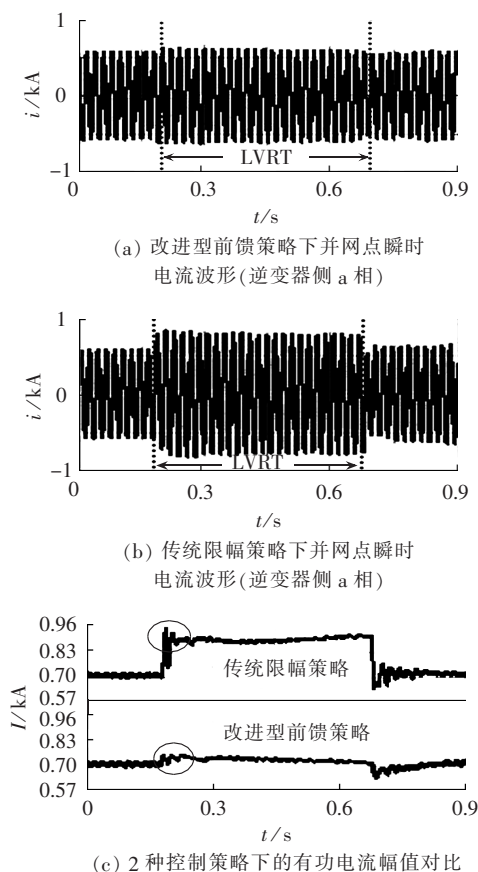


图 7 对称故障下 2 种控制策略的并网电流对比
Fig.7 Comparison of grid-connecting current between two control strategies under symmetrical fault

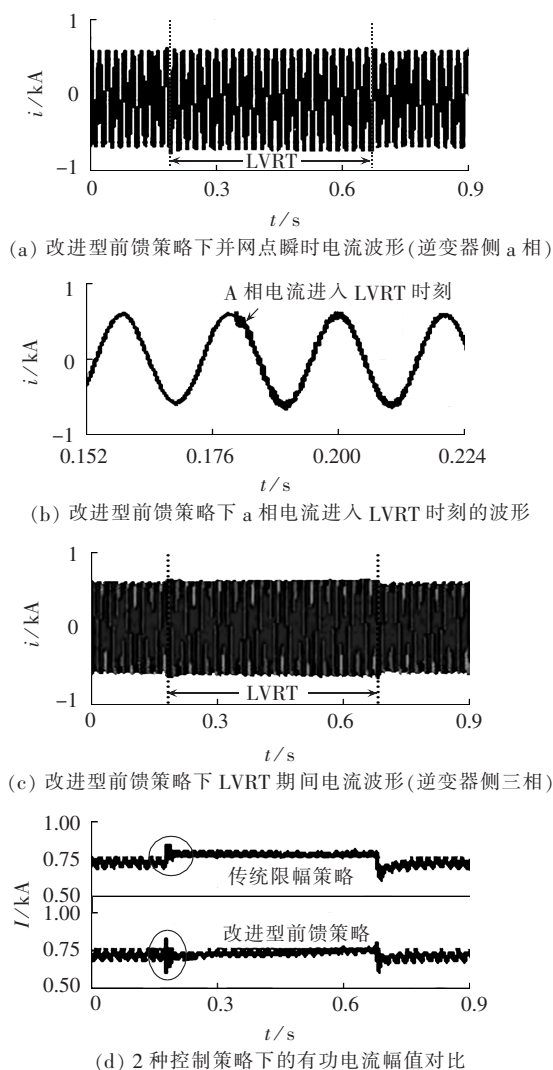


图 8 对称故障下 HIL 仿真结果

Fig.8 Results of HIL simulation for symmetrical fault

控制策略下有功电流幅值变化的对比,从图中圆图标标注处可看出改进型前馈策略下的并网电流在电压跌落瞬间的过冲小于传统限幅策略,且在整个 LVRT 过程中,改进型前馈策略下有功电流均值相对后者较小。

同样地,对 2 种策略下并网电流 a 相的谐波情况进行监测,改进型前馈策略下电流在故障发生瞬间的 2、3 次谐波幅值达到峰值,分别为 0.0343 kA、0.0240 kA;传统限幅策略下相对应的值分别为 0.0434 kA、0.0257 kA。无论是从绝对值还是谐波所占的比例来看,改进型前馈策略对谐波的抑制效果更加明显。综上所述,采用改进型电网电压前馈控制策略在过电流以及谐波抑制问题上的优势在 HIL 仿真平台上得到了有效验证。

对于常见的电网电压发生不对称跌落的情况,由于故障期间电网电压包含负序分量^[20],单纯地采用本文提出的改进型前馈策略并不足以完全消除并网电流存在的幅值不平衡的现象,此时需要结合二

次陷波法将电压和电流的正负序分量分离^[21]并采用如图 4 所示的改进型前馈策略分别对正负序分量进行控制。由于将正负序分量分离之后的控制策略和对称跌落时几乎一致,此处不再单独将仿真和 HIL 验证结果列出,其运行结果均展示出改进型电网电压前馈控制策略良好的过电流及谐波抑制性能,能使系统顺利实现电网电压发生不对称跌落下的 LVRT。

4 结论

本文运用全电压反馈的思想,改进传统的电网电压前馈控制策略,通过深入分析三相并网光伏发电系统的数学模型,推导出改进型电压前馈控制策略的前馈项,并将其用于光伏系统的 LVRT 过程中,使系统顺利实现 LVRT 并展示出了一定的优越性,得到的相关结论如下:

a. 改进型电网电压前馈控制策略中,并网电流受电网电压的影响程度大幅减小,仅受电流给定参考值的影响,为 LVRT 过程中的过电流和谐波问题提供了更优良的解决方案;

b. 本文所提控制策略仅需在算法上进行相应改进,不需要增加额外硬件设备,思路明确清晰,易于工程实施;

c. HIL 实时仿真验证了本文所提控制策略在对称故障穿越期间能有效抑制过电流、减少谐波影响、保持更好的波形质量,具有更优越的暂态性能,与传统限幅策略进行的对比分析验证了其可行性与有效性。

参考文献:

- [1] 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 Xiaodong,ZHU Lingzhi,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.
- [2] 罗劲松. 大型光伏电站低电压穿越技术研究[D]. 银川:宁夏大学,2014.
LUO Jinsong. Research on low voltage ride through technology of large-scale photovoltaic power station[D]. Yinchuan:Ningxia University,2014.
- [3] 柏浩峰. 光伏并网逆变器低电压穿越技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.
BO Haofeng. Study on low voltage ride through technology of grid-connected photovoltaic inverter[D]. Xuzhou:China University of Mining & Technology,2014.
- [4] 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.
AN Zhilong. Research on the integration control strategy and low voltage ride-through technology of grid-connected PV system [D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.

- [5] 杨堤,程浩忠,马紫峰,等. 基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力的分析和展望[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):1-10.
YANG Di, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Analysis and prospect of LVRT improvement based on energy storage technology for wind turbine generator system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 1-10.
- [6] 张文娟,马浩森,张国慨,等. 基于转子串联电阻的双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):28-33.
ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, ZHANG Guokai, et al. Low voltage ride-through of doubly-fed induction generator based on rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 28-33.
- [7] 王南,陈艺峰,吴恒亮. 光伏并网逆变器低电压穿越技术研究[J]. 大功率变流技术,2013(1):38-42.
WANG Nan, CHEN Yifeng, WU Hengliang. Research on the technology of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic inverter[J]. High Power Converter Technology, 2013(1): 38-42.
- [8] 周京华,刘劲东,陈亚爱,等. 大功率光伏逆变器的低电压穿越控制[J]. 电网技术,2013,37(7):1799-1807.
ZHOU Jinghua, LIU Jindong, CHEN Yaai, et al. Low voltage ride-through control of high power inverter for grid-connection of photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1799-1807.
- [9] 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,2013,38(12):136-141.
ZHANG Yajing, ZHENG Qionglin, MA Liang, et al. LVRT of photovoltaic grid-connected inverter adopting dual-loop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 38(12): 136-141.
- [10] 舒大松,黄攀雄,康伦,等. 基于超级电容储能的光伏并网低电压穿越研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(8):60-64.
SHU Dasong, HUANG Zhixiong, KANG Lun, et al. Research on the low voltage ride-through of grid-connected photovoltaic system based on supercapacitor energy storage[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2014, 41(8): 60-64.
- [11] 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.
JIA Lihu, ZHU Yongqiang, SUN Xiaoyan, et al. A control method of low voltage ride through for photovoltaic plant based on model current predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 68-74.
- [12] 吴云亚,谢少军,阚加荣,等. 逆变器侧电流反馈的LCL并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):54-60.
WU Yunya, XIE Shaojun, KAN Jiarong, et al. A full grid voltage feed-forward control strategy with inverter-side current feedback for LCL grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 54-60.
- [13] LI Weiwei, RUAN Xinbo, PAN Donghua, et al. Full-feedforward schemes of grid voltages for a three-phase LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2237-2250.
- [14] WANG Xuehua, RUAN Xinbo, LIU Shangwei, et al. Full feed-forward of grid voltage for grid-connected inverter with LCL filter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3119-3127.
- [15] 张兴. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社,2011:133-136.
- [16] 郑飞,张军军,丁明昌. 基于RTDS的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):19-24.
ZHENG Fei, ZHANG Junjun, DING Mingchang. Low voltage ride through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 19-24.
- [17] LIN Chiming, YOUNG Chungming, YEH Weishan, et al. An LVRT control strategy for reducing DC-Link voltage fluctuation of a two-stage photovoltaic multilevel inverter[C]//IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2013: 908-913.
- [18] 梁海峰,冯燕闯,刘子兴,等. 基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(21):110-115.
LIANG Haifeng, FENG Yanchuang, LIU Zixing, et al. Research on low voltage ride through of photovoltaic plant based on deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 110-115.
- [19] 李生虎,安锐,许志峰,等. 混合风电场中PMSG协助感应发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):21-27.
LI Shenghu, AN Rui, XU Zhifeng, et al. Coordinated LVRT of IG and PMSG in hybrid wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 21-27.
- [20] 谭会征,李永丽,陈晓龙,等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):31-37.
TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37.
- [21] 田昊. 光伏并网逆变器低电压穿越技术研究[D]. 济南:山东大学,2014.
TIAN Hao. Research on low voltage ride-through technique of grid-tied photovoltaic inverters[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.

作者简介:



顾浩瀚

顾浩瀚(1992—),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动、大规模新能源发电并网技术等(E-mail: guhaohan1992@163.com);

蔡旭(1964—),男,江苏徐州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能电网技术、大功率电力电子、大规模新能源发电并网技术;

李征(1961—),女,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为分布式电能系统控制及接入、储能系统应用、复杂大系统。

(下转第31页 continued on page 31)

Probabilistic risk assessment of ATC based on reflective slice sampling
for power system with wind farm

ZHANG Xiaoying¹,JIA Lei¹,WANG Kun²,ZHANG Labao³,CHEN Wei¹

- (1. School of Electrical and Information Engineering,Lanzhou University of Technology,Lanzhou 730050,China;
- 2. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Research Institute,Lanzhou 730030,China;
- 3. School of Electronic Science and Engineering,Nanjing University,Nanjing 210093,China)

Abstract: In order to enhance the speed and precision of the probabilistic distribution sampling of wind-farm power-output and further to effectively assess the ATC(Available Transfer Capability),it is essential to comprehensively consider the fluctuation and randomness of wind power,for which,an improved method based on RSS(Reflective Slice Sampling) is proposed to assess the probabilistic risk of the ATC of power system with wind farm. An optimal model of wind-farm power-output is established and then sampled based on RSS to construct a sample space. Samples are then applied to the power flow equations for calculating the optimal power flow and the ATC assessment indexes are statistically analyzed. The simulative results of IEEE 30-bus system with a wind farm show that,compared with traditional Gibbs sampling,the proposed method improves the precision of sampling method while ensures the calculation efficiency.

Key words: wind farm integration; wind farms; available transfer capability; reflective slice sampling; Gibbs sampling; weighted Gaussian mixture distribution; risk assessment

(上接第 19 页 continued from page 19)

LVRT control strategy based on improved grid-voltage feed-forward
for photovoltaic station

GU Haohan,CAI Xu,LI Zheng

(Wind Power Research Center,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

Abstract: A full voltage feed-forward control strategy is proposed for the LVRT(Low-Voltage Ride-Through) of grid-connected three-phase PV(PhotoVoltaic) power generation system. A mathematical model of PV power generation system is built and the specific expressions of feed-forward terms in the control loops are derived. The overall control scheme,which feeds the grid voltage forward via the feed-forward terms to the control loop, reduces significantly the impact of sudden grid-voltage change on the grid-connecting current to suppress the over-current and harmonics during LVRT. Verification is carried out on the HIL(Hardware-In-Loop) platform based on RTDS(Real-Time Digital Simulator) and the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy in improving the grid-connecting current during LVRT are proved by the comparison between it and traditional control method.

Key words: grid-connected photovoltaic generation system; full voltage feed-forward; low-voltage ride-through; dq transform; correction factor; harmonic suppression