

弱网下并网逆变器LVRT双模式切换控制策略

刘芳¹,徐韞钰¹,何国庆²,李光辉²,刘世权¹,刘威¹

(1.合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009;

2.中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:随着分布式电源渗透率的提高,电网呈现弱网的趋势。弱网下当电网电压发生跌落时,帮助系统实现低电压穿越(LVRT)至关重要。针对弱网下电网电压跌落引起的过电流、电压崩溃、系统振荡等一系列问题,提出了一种并网逆变器LVRT双模式切换的控制策略:当电网电压在0.7~1.0(标么值)范围时采用定交流电压控制模式;当电网电压在0~0.7(标么值)范围时采用定无功电流控制模式。此外,在电压恢复期间采用有功电流斜坡控制,可有效缓解电压恢复期间系统失稳等问题。最后,在Matlab中对双模式切换控制策略进行仿真分析,验证了该控制策略的可行性。

关键词:弱网;并网逆变器;低电压穿越;定交流电压;控制策略

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24068

LVRT Dual-mode Switching Control Strategy of Grid-connected Inverter Under Weak Grid

LIU Fang¹, XU Yunyu¹, HE Guoqing², LI Guanghui², LIU Shiquan¹, LIU Wei¹

(1.School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2.China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: With the increasing permeability of distributed generation, the grid becomes weaker and weaker. It is very important to help the system achieve low voltage ride through (LVRT) when the grid voltage drops under weak grid. Aiming at a series of problems such as over-current, voltage collapse and system oscillation caused by the drop of grid voltage under weak grid, a control strategy of LVRT dual-mode switching for grid-connected inverter was proposed. When the grid voltage was in the range of 0.7~1.0 (per unit), the constant AC voltage control mode was adopted; when the grid voltage was in the range of 0~0.7(per unit), the constant reactive current control mode was adopted. In addition, to solve the problem of system oscillation during voltage recovery, the active current ramp control was proposed during voltage recovery. Finally, dual-mode switching control strategy was simulated in Matlab to verify the feasibility of the control strategy.

Key words: weak grid; grid-connected inverter; low voltage ride through(LVRT); constant AC voltage; control strategy

我国的新能源设备大多安装在西部地区,而用电负荷多集中在东南沿海一带,且随着新能源系统容量逐渐增大,并网阻抗逐渐增大,电网逐渐呈现弱网特性^[1-3]。当短路比 $SCR>3$ 时,电网被认定为强网;当短路比 $SCR<3$ 时,电网被认定为弱网^[4]。弱网下的电网电压跌落易引起过电流、电压崩溃、系统振荡等一系列问题^[5]。因此,弱网下电网电压发生跌落时,帮助电网电压恢复与保

证系统稳定运行已成为当下的研究热点^[6-8]。

近年来,国内外专家从不同角度探讨了弱网下电压跌落时的低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)问题,提出了定交流电压控制、定无功电流控制、定子电流微分前馈控制、改进的网侧变换器控制、变功率因数无功控制等一系列并网逆变器控制方法。定交流电压控制方法以电网电压额定幅值作为无功轴电压指令,以并网点电压

基金项目:中国电力科学研究院有限公司委托项目(NYB51202002811)

作者简介:刘芳(1980—),女,博士,副教授,Email:fragcelau@hfut.edu.cn

通讯作者:徐韞钰(1997—),男,硕士,Email:1315209692@qq.com

幅值作为被控量,然后经过PI调节得到无功电流指令,从而为系统提供无功补偿。文献[9-10]中的并网逆变器采用定交流电压的控制方法,具有一定的低电压穿越能力,但是在弱网下电压跌落较深时,该方法难以有效支撑电网电压且系统存在振荡现象。定无功电流控制方法不设电压外环,通过控制算法直接给出无功电流指令。文献[11-12]中的并网逆变器采用定无功电流的控制方法,该方法在电网电压跌落时优先发出无功电流以支撑电网电压的恢复,但是由于定无功电流控制算法所得的无功电流指令受无功补偿系数的制约,导致弱网下系统存在振荡的情况。文献[13]提出了一种基于定子电流微分前馈控制的风机低电压穿越复合控制方法,将定子电流微分项获取到的造成转子电流冲击的干扰量,经前馈控制器直接引入到转子侧变流器的控制电压参考值端,从而达到快速抑制转子过电流的目的,该控制方法面对不同的电压跌落情况都具有一定的LVRT能力,但是弱网下系统存在振荡的现象。文献[14]提出了一种改进的网侧变换器控制策略,无功轴在电压外环加入无功功率控制环节来尽可能地提供无功补偿,有功轴在电压外环加入前馈补偿分量来提高直流母线电压的调节速度,该方法能够帮助故障电网快速恢复,但是弱网下

系统存在振荡现象。文献[15]提出了一种基于变功率因数无功控制的低电压穿越控制策略,根据跌落深度调整机组发出的无功,能够在一定程度上提高故障稳定性,然而弱网下机端电流存在波动。

综上所述,不同电压跌落情况下采用单一的控制模式往往不能保证最优的无功补偿效果,导致系统失稳,而目前关于弱网下并网逆变器 LVRT 模式切换控制策略方面的内容鲜有研究,因此,针对弱网下电网电压跌落引起的过电流、电压崩溃、系统振荡等一系列问题,本文提出一种并网逆变器 LVRT 双模式切换的控制策略:当电网电压在 0.7~1.0(标么值)范围时采用定交流电压控制模式;当电网电压在 0~0.7(标么值)范围时采用定无功电流控制模式。此外,针对电压跌落恢复期间系统易发生振荡的问题,采用有功电流斜坡控制,使有功电流缓慢过渡到稳态值,能够有效缓解系统振荡等问题,提高系统稳定性。最后,在 Matlab 中对双模式切换控制策略进行仿真分析,验证了该控制策略的可行性。

1 并网逆变器 LVRT 双模式切换控制框图

LVRT 双模式切换控制策略框图如图 1 所示。

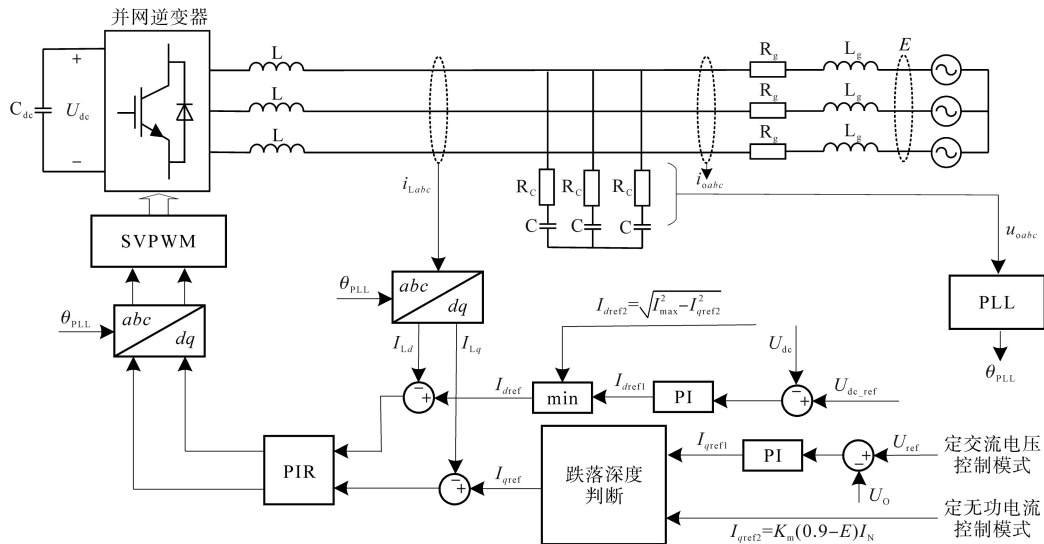


图1 LVRT 双模式切换控制策略

Fig.1 LVRT dual mode switching control strategy

图 1 中, C_{dc} 为直流侧电容, L 为滤波电感, C 为滤波电容, R_c 为滤波电容串联的无源阻尼电阻, R_g 为并网等效电阻, L_g 为并网等效电感; U_{dc} 为直流侧电压, i_{Labc} 为并网逆变器桥臂侧电感电流, u_{oabc} 为并网点交流电压, i_{oabc} 为并网点交流电流, E 为

电网电压幅值, θ_{PLL} 为锁相环 (phase locked loop, PLL) 根据并网点电压 u_{oabc} 获得的相角, U_{dc} 为直流侧额定电压, I_{Ld}, I_{Lq} 分别为并网逆变器桥臂侧滤波电感电流的 d 轴分量与 q 轴分量, U_{ref} 为电网电压额定幅值, U_o 为并网点电压幅值, I_{dref}, I_{qref} 分别

为电流环 d 轴电流指令与 q 轴电流指令。

如图1所示,并网逆变器LVRT双模式切换控制是定交流电压与定无功电流两种控制模式根据电压跌落深度进行切换的控制策略。定交流电压控制模式指的是以电网电压额定幅值 U_{ref} 作为指令值、并网点电压幅值 U_0 作为被控量,经过PI控制器得到无功电流指令 I_{qref1} ;定无功电流控制模式指的是直接给出无功电流指令 I_{qref2} 的控制算法。电网电压正常时,并网逆变器采用定交流电压控制方法,电压跌落期间采用双模式切换控制策略,电压恢复期间采用有功电流斜坡控制。

2 LVRT双模式切换控制策略

2.1 无功控制双模式切换分析

根据电路原理,并网变流器输出的并网点电压(忽略电阻)为

$$U_0 = E \cos \theta_{PLL} - X_g I_{Lq} = \sqrt{E^2 - X_g^2 I_{Ld}^2} - X_g I_{Lq} \quad (1)$$

式中: X_g 为并网等效电感电抗。

由式(1)可知, I_{Lq} 减小(I_{Lq} 为负值, I_{Lq} 减小, I_{Lq} 的绝对值增大),并网点电压幅值会增大。因此,当电网电压跌落时,并网变流器加以无功电流控制可以帮助恢复电网电压。

本文采用双模式切换控制策略来实现电压跌落情况下的故障穿越,具体可见图1中的无功轴控制部分。

无功轴的电流指令 I_{qref} 取值为

$$I_{qref} = \begin{cases} I_{qref1} & D \leq 0.3 \\ I_{qref2} & D > 0.3 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$D = 1 - E/U_{ref}$$

式中: I_{qref1} 为定交流电压控制得到的无功电流指令; I_{qref2} 为定无功电流控制的电流指令; D 为电网电压跌落深度。

定交流电压控制的电流指令 I_{qref1} 为

$$I_{qref1} = (K_{cp} + K_{ci}/s)(U_{ref} - U_0) \quad (3)$$

式中: K_{cp} 为定交流电压外环控制器的比例控制系数; K_{ci} 为定交流电压外环控制器的积分控制系数。由式(3)可知,电网电压跌落越深,无功电流指令 I_{qref1} 的绝对值越大,系统发出的无功越多,越有利于实现LVRT。然而,弱网下系统存在复杂的交互情况,为保证系统稳定,比例控制系数 K_{cp} 与积分控制系数 K_{ci} 的调节范围有限,导致无功电流指令 I_{qref1} 的值相对较小,所以定交流电压控制方法

更适合电网电压跌落较浅的情况。通过大量仿真分析,弱网下当电网电压跌落深度 $D \leq 0.3$ 时,定交流电压控制方法的稳定性比定无功电流控制方法的稳定性更好。

定无功电流控制的电流指令 I_{qref2} 为

$$I_{qref2} = K_m (0.9 - E) I_N \quad (4)$$

式中: K_m 为无功补偿系数(本文取 $K_m=1.8$); I_N 为并网逆变器额定电流。

根据各国电网导则要求可知,低电压穿越期间,新能源系统需向电网注入与电网电压跌落深度不少于一定比例的无功电流^[6]。定无功电流控制方法发出的无功电流可以由控制算法直接给出,根据电网电压跌落深度改变无功补偿系数 K_m 的大小即可调节无功电流的大小,所以为了使双模式切换控制策略能够适应不同的电网电压跌落深度,取无功补偿系数 $K_m=1.8$,此时的系数较大,新能源系统发出的无功电流较大,更适合电网电压跌落较深的情况。通过大量仿真分析,弱网下当电网电压跌落深度 $D > 0.3$ 时,定无功电流控制方法的稳定性比定交流电压控制方法的稳定性更好。

综上所述,本文采用 dq 分解法^[17]检测电网电压跌落深度 D ,在电网电压处于0.7~1.0(标么值)范围时(即电网电压跌落深度 D 处于0~0.3范围内)采取定交流电压控制模式;在电网电压处于0~0.7(标么值)范围时(即电网电压跌落深度 D 处于0.3~1.0范围内)采用定无功电流控制模式,具体的模式切换流程图如图2所示。

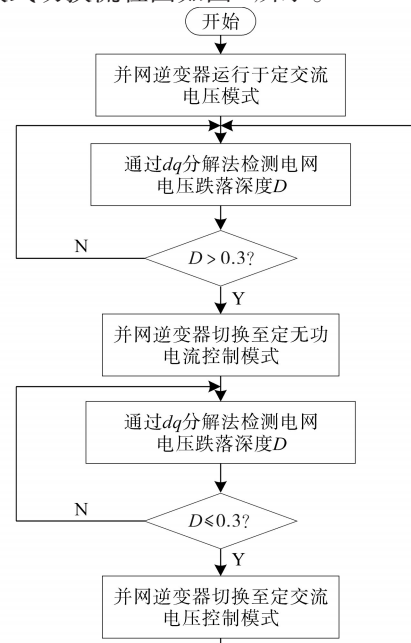


图2 双模式切换流程图

Fig.2 Dual mode switching flow chart

2.2 有功电流斜坡控制与限幅

当故障切除后,电网电压恢复稳定值,此时有功电流指令值会发生突变,易造成系统振荡等问题。为了缓解系统振荡,本文采用有功电流斜坡控制:在电压恢复期间,让有功电流指令从电压跌落期间的指令值按斜率缓慢变为系统稳态时的指令值。通过有功电流斜坡控制环节,并网点电压与电流波形的尖峰被明显降低,有效缓解了电压恢复期间的系统振荡等问题,提高了系统的稳定性。

此外,为满足器件的电流应力要求,必须对有功电流进行限幅,防止电流输出过大而损坏功率器件。具体的限幅方法可见图1中有功轴控制部分,有功轴电流指令 I_{dref} 为

$$I_{dref} = \min(I_{dref1}, I_{dref2}) \quad (5)$$

其中 $I_{dref2} = \sqrt{I_{max}^2 - I_{qref2}^2} \quad (6)$

式中: I_{dref1} 为有功轴直流电压外环输出的电流指令; I_{max} 为并网逆变器允许的最大输出电流(通常取额定输出电流的1.1倍)。

通过式(5)对 d 轴有功电流进行限制:当电流指令 I_{dref1} 小于电流指令 I_{dref2} 时,说明网侧变流器的直流电压外环能够调节直流电压,此时有功电流参考值取 I_{dref1} ;当电流指令 I_{dref1} 大于电流指令 I_{dref2} 时,说明网侧变流器的直流电压外环已失去直流侧控制能力,此时有功电流参考值取 I_{dref2} 。

3 仿真分析

3.1 仿真参数

本文在短路比 $SCR=1.5$ 下,针对不同电压跌落情况进行了仿真,具体的仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
U_{base}	1 140 V	L	0.16 mH
P_{base}	4.5 MW	C	600 μ F
U_{dc_ref}	1 800 V	R_C	0.01 Ω
f_s	2 kHz	R_g	0.01 Ω
f_0	50 Hz	L_g	0.61 mH

3.2 仿真结果

图3、图4、图5分别为在3~4 s电网电压跌落深度 $D=0.2$ 时采用定交流电压控制的直流侧电压波形、并网逆变器桥臂侧电感电流 d 轴与 q 轴分量波形、并网点电压与电流波形。图6为在3~4 s电网电压跌落深度 $D=0.2$ 时采用定无功电流控制的并网点电压与电流波形。

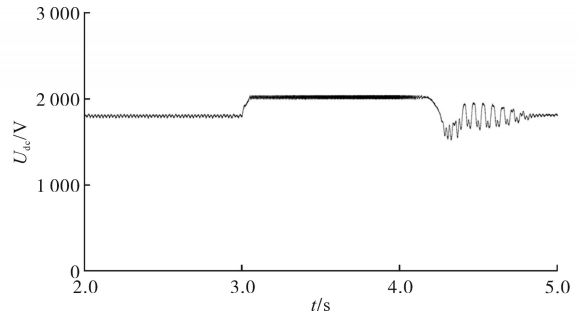


图3 定交流电压控制的直流侧电压波形($D=0.2$)

Fig.3 DC side voltage waveform controlled by constant AC voltage($D=0.2$)

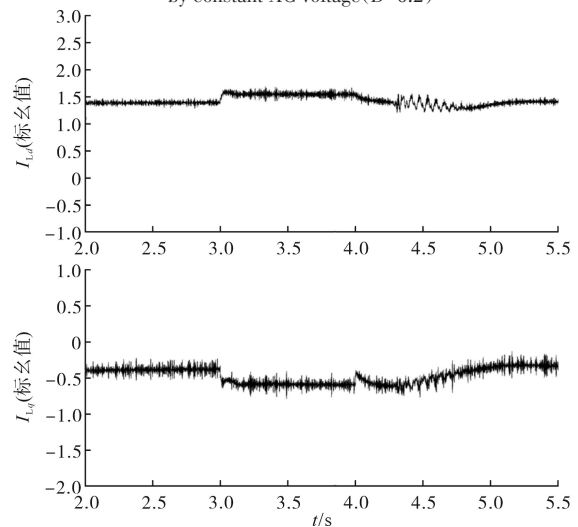


图4 定交流电压控制的桥臂侧电感电流 d 轴与 q 轴分量波形($D=0.2$)

Fig.4 d -axis and q -axis component waveforms of bridge arm side inductance current controlled by constant AC voltage($D=0.2$)

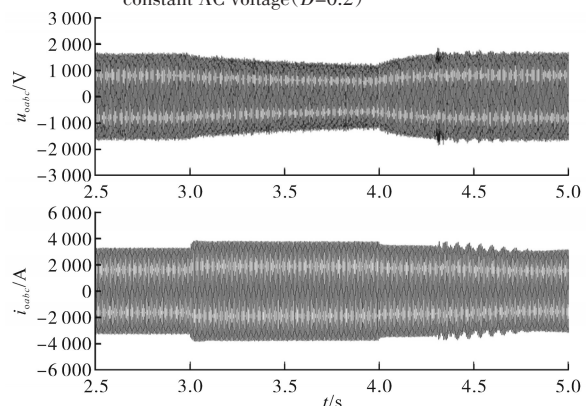


图5 定交流电压控制的并网点电压与电流波形($D=0.2$)

Fig.5 Grid connected voltage and current waveforms controlled by constant AC voltage($D=0.2$)

由图3可知,直流侧电压在电压跌落前稳定运行,在3~4 s跌落期间被限幅,在电压恢复期间由于有功电流指令按斜率变化出现短暂波动,然后迅速恢复正常运行;由图4可知,定交流电压控制模式在电压跌落期间无功电流增大,给系统提供无功补偿,有功电流、无功电流在电压恢复期

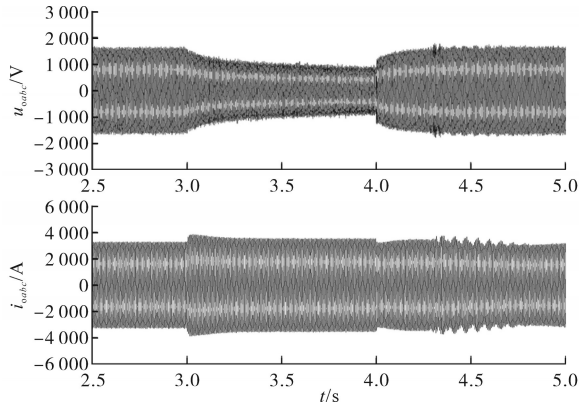


图6 定无功电流控制的并网点电压与电流波形($D=0.2$)

Fig.6 Grid connected voltage and current waveforms controlled by constant reactive current($D=0.2$)

间出现短暂波动,最终恢复正常运行;由图5可知,并网点电压在电网电压跌落期间被有效抬升,并网点电流在额定范围内运行,并网点电压、并网点电流在电压恢复期间出现短暂波动,然后恢复稳定。由图5与图6对比可知,在电压跌落深度较浅时,定交流电压控制比定无功电流控制具有更强的实现低电压穿越的能力。

图7、图8分别为在3~4s电网电压跌落深度 $D=0.5$ 时采用定无功电流控制的直流侧电压波形、并网逆变器桥臂侧电感电流 d 轴与 q 轴分量波形。图9为在3~4s电网电压跌落深度 $D=0.5$ 时采用定无功电流控制且不设有功电流斜坡控制的桥臂侧电感电流 d 轴与 q 轴分量波形。图10、图11分别为在3~4s电网电压跌落深度 $D=0.5$ 时采用定无功电流控制、定交流电压控制的并网点电压与电流波形。

由图7、图8、图10可知,直流侧电压、桥臂侧电流、并网点电压与并网点电流在电压恢复期间出现短暂波动,然后迅速恢复稳定运行,且并网点电流在额定范围内运行,并网点电压在跌落期间被有效抬升。由图9可知,当有功电流不设斜坡控制的时候,在电压恢复期间有功电流无法回

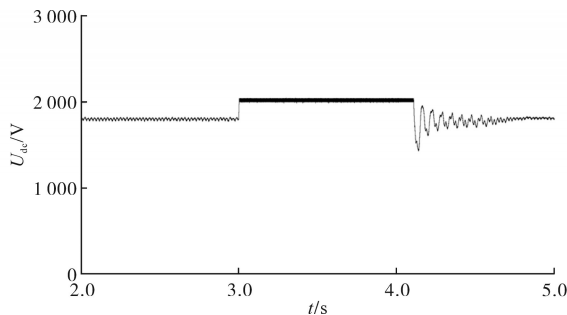


图7 定无功电流控制的直流侧电压波形($D=0.5$)

Fig.7 DC side voltage waveform controlled by constant reactive current($D=0.5$)

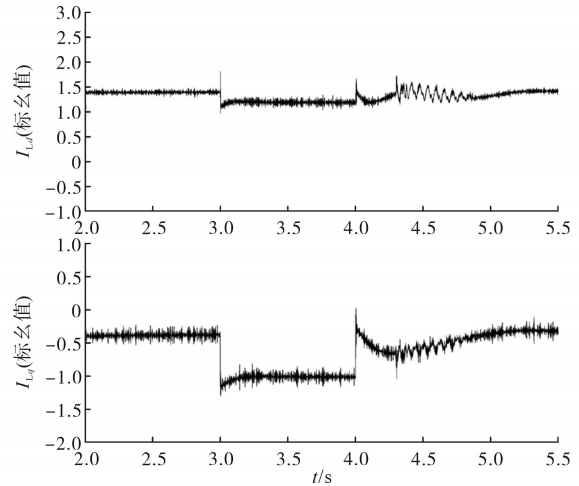


图8 定无功电流控制的桥臂侧电感电流 d 轴与 q 轴分量波形($D=0.5$)

Fig.8 d -axis and q -axis component waveforms of bridge arm side inductance current controlled by constant reactive current($D=0.5$)

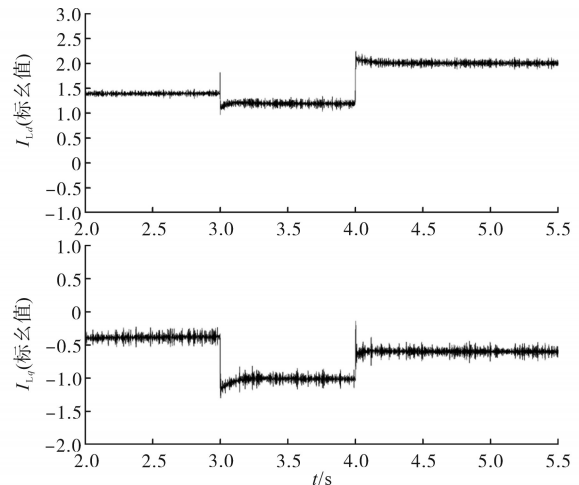


图9 不设有功电流斜坡控制的桥臂侧电感电流 d 轴与 q 轴分量波形($D=0.5$)

Fig.9 d -axis and q -axis component waveforms of bridge arm side inductance current without active power current ramp control($D=0.5$)

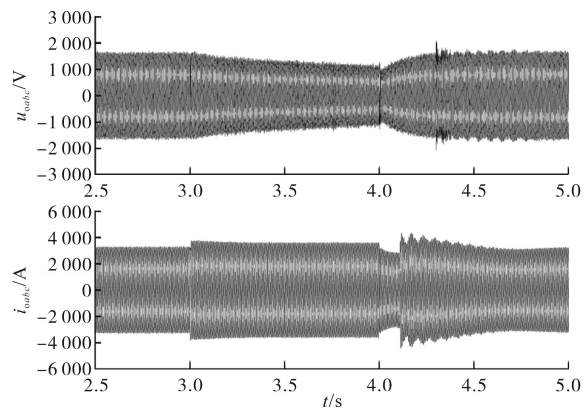


图10 定无功电流控制的并网点电压与电流波形($D=0.5$)

Fig.10 Grid connected voltage and current waveforms controlled by constant reactive current($D=0.5$)

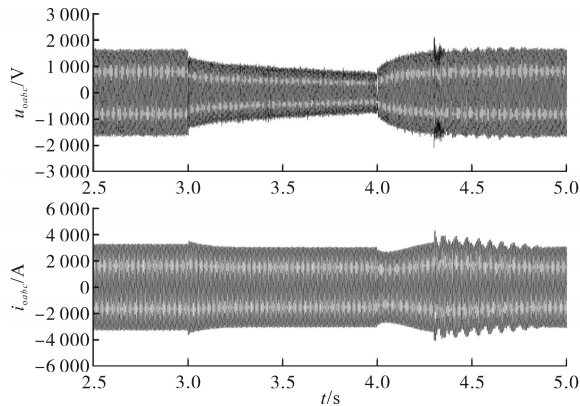


图 11 定交流电压控制的并网点电压与电流波形($D=0.5$)

Fig.11 Grid connected voltage and current waveforms controlled by constant AC voltage($D=0.5$)

到正常的指令值,系统失稳,故增设有功电流斜坡控制能有效提高系统稳定性。由图 10 与图 11 对比可知,在电压跌落程度较深时,定无功电流控制比定交流电压控制具有更强的实现低电压穿越的能力。

综上所述,并网逆变器 LVRT 双模式切换控制策略能够有效帮助系统实现低电压穿越,并且提高了系统的稳定性,该控制策略有效。

4 结论

本文针对弱网下电网电压跌落引起的过电流、系统振荡等一系列问题,提出并网逆变器 LVRT 双模式切换的控制策略,对该控制策略进行理论分析与仿真验证,最终得出结论如下:

1)弱网下电网电压发生不同程度的跌落时,并网逆变器 LVRT 双模式切换的控制策略能够有效减小系统振荡,保证并网点电流在额定范围内运行以及帮助电网电压恢复;

2)电压恢复期间采用有功电流斜坡控制,让有功电流指令按斜率变化,有功电流在电压恢复期间缓慢恢复到稳态值,有效缓解了系统振荡等问题,提高了系统的稳定性。

参考文献

[1] 胡祺,付立军,马凡,等.弱网下基于锁相环控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J].中国电机工程学报,2021,41(1):98-108,401.
HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Small signal synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1):98-108, 401.

[2] 王磊,张琛,李征,等.双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):85-90.

WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13):85-90.

[3] 李明,张兴,郭梓暄,等.弱网下基于电网阻抗自适应的双模式并网稳定控制策略[J].太阳能学报,2021,42(7):86-93.
LI Ming, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Grid impedance adaption dual mode grid-connected stability control strategy in a weak grid[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(7):86-93.

[4] Committee D. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: 1204-1997 [S]. New York:IEEE, 1997.

[5] 袁辉,宋晓喆,孙福寿,等.弱网中低电压穿越控制策略导致的双馈风机失稳机理分析[J].电力自动化设备,2020,40(9):50-58.
YUAN Hui, SONG Xiaozhe, SUN Fushou, et al. Analysis of LVRT control strategy-oriented DFIG instability mechanism in weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9):50-58.

[6] 王归新,司新放.双馈风电系统低电压穿越的联合控制策略[J].电气传动,2017,47(11):50-54.
WANG Guixin, SI Xinfang. Joint control strategy for low voltage ride through in doubly fed wind power system[J]. Electric Drive, 2017, 47(11):50-54.

[7] GATAVI E, HELLANY A, NAGRIAL M, et al. An integrated reactive power control strategy for improving low voltage ride-through capability[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 5(4):1-14.

[8] 马州生,张发厅.基于定子串联阻抗的DFIG低电压穿越控制策略[J].电气传动,2020,50(6):66-71.
MA Zhousheng, ZHANG Fating. Low voltage ride through control strategy of doubly fed induction generator based on stator series impedance[J]. Electric Drive, 2020, 50(6):66-71.

[9] 殷桂梁,王海轮,王硕,等.电网电压跌落下双馈发电机矢量控制策略的改进[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(10):111-116.
YIN Guiliang, WANG Hailun, WANG Shuo, et al. Improvement of vector control strategy for double-fed wind turbine under grid voltage drop[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020, 32(10):111-116.

[10] NIE Xiong, XIE Yunxiang, CHEN Bing, et al. A low voltage ride through strategy for three-phase distributed generation inverters during voltage sags[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2016:933-938.

[11] 姜惠兰,李天鹏,吴玉璋.双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J].高压技术,2017,43(6):2062-2068.
JIANG Huilan, LI Tianpeng, WU Yuzhang. Integrated strategy for low voltage ride through of doubly-fed induction generator [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6):2062-2068.

(下转第 48 页)

response and ladder-type carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5): 87-95, 101.

[15] 代贤忠, 韩新阳, 靳晓凌. 需求响应参与电力平衡的成本效益评估方法[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 170-177.
DAI Xianzhong, HAN Xinyang, JIN Xiaoling. Cost-benefit assessment method for demand response participation in power balance[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 170-177.

[16] 黄文轩, 刘道兵, 李世春, 等. 双碳目标下含P2G与需求响应的综合能源系统双层优化[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 8-17.
HUANG Wenxuan, LIU Daobing, LI Shichun, et al. Two-level optimization of integrated energy system with P2G and demand response under dual carbon objective[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 8-17.

[17] 王仕炬, 刘天琪, 何川, 等. 基于舒适度的需求响应与碳交易的园区综合能源经济调度[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 1-7.
WANG Shiju, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Comfort demand response and carbon trading based comprehensive energy economic dispatching in industrial parks[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 1-7.

[18] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1321, 1538.
LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1307-1321, 1538.

[19] 尹硕, 张鹏, 杨萌, 等. 计及需求侧响应的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(11): 35-42.
YIN Shuo, ZHANG Peng, YANG Meng, et al. Multi-time scale optimal scheduling of integrated energy systems considering demand-side response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(11): 35-42.

收稿日期: 2022-03-06
修改稿日期: 2022-03-17

~~~~~

(上接第 18 页)

[12] SHANG L, LI P, LI Z. Low voltage ride through control method of photovoltaic grid-connected inverter based on model current predictive control[C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2018: 5209-5214.

[13] 姜惠兰, 王邵辉, 贾燕琪, 等. 基于定子电流微分前馈控制的双馈异步风力发电机低电压穿越复合控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 198-204.  
JIANG Huilan, WANG Shaohui, JIA Yanqi, et al. Low-voltage ride-through compound control strategy of doubly-fed induction generator based on stator current differential feedforward control [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 198-204.

[14] 孙丽玲, 王艳娟. 基于Crowbar串联电容的双馈风机低电压穿越综合控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2089-2095.  
SUN Liling, WANG Yanjuan. LV ride through control strategy of doubly fed induction generator based on Crowbar series capacitor[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2089-2095.

[15] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅, 等. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 62-67.  
ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei, et al. Comprehensive control strategy for improving low-voltage ride-through capability of permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 62-67.

[16] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 25-36.

[17] 阮新波, 王学华, 潘冬华, 等. LCL型并网逆变器的控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
RUAN Xinbo, WANG Xuehua, PAN Donghua, et al. Control technology of LCL grid connected inverter[M]. Beijing: Science Press, 2015.

收稿日期: 2021-11-08  
修改稿日期: 2022-02-14