

新型永磁风电系统的低电压穿越性能研究

张明锐, 黎娜, 王之馨

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 提出一种基于固态变压器的新型永磁风电并网系统, 采用超级电容构建 Crowbar 电路实现低电压穿越功能, 并网逆变器采用正负序电压定向控制策略。研究了超级电容工程模型的充放电特性, 根据低电压穿越要求, 计算出 Crowbar 电路中超级电容的容量, 通过直流母线功率平衡要求在 Crowbar 电路控制中采用电压差检测的方法, 控制超级电容的充放电。仿真结果表明, 该系统在各种电压跌落情况下均能维持直流母线电压稳定, 并网电流保持正弦。

关键词: 风电; 低电压穿越; 超级电容; Crowbar 电路; 充放电特性; 电压控制; 模型

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.022

0 引言

大容量并网型风电系统在电网故障情况下的持续运行能力直接影响电网对风电的消纳能力和风电场的经济效益, 风电机组的低电压穿越 LVRT (Low Voltage Ride Through) 能力正是衡量这种持续运行能力的重要指标, 其意义在于: 电网电压跌落时, 风电机组可以通过功率支持帮助电网恢复正常电压而不是脱离电网^[1]。因此, 对风电系统 LVRT 能力的研究具有十分重要的工程应用价值。

在实际的电力系统中, 三相短路故障发生的概率不大, 但造成的后果最严重; 单相接地短路和两相短路故障等引起的电网电压不对称跌落, 将导致风电系统直流母线产生 2 次纹波^[2-3], 并网电流产生 3 次谐波^[4], 对系统中功率器件造成严重安全威胁。在电网不对称故障下实现 LVRT 的方法主要有以下几种。

a. 采用硬件方式, 在并网逆变器交流侧加装带通滤波器, 以滤除三相不平衡电压中的负序分量。此方法需要额外的滤波器件, 成本较高。

b. 改进控制方法^[4-5], 有代表性的是在 PI 控制支路上并联 RES 控制器 (非理想谐振控制器), 构成一种新型的 PI-RES 控制器, 实现对 2 倍频交流信号的稳态无差控制。文献^[4]采用 3 个 PI-RES 控制器来调节直流电压和瞬时功率, 省去了正负序分解与合成计算, 减少了计算量, 但其控制系统较为复杂。

c. 在控制算法上, 采用对称分量法, 将不对称电压、电流作正负序分解后分别控制^[6]。此方法计算量

较大, 但控制效果好。

综合考虑, 风电机组实现 LVRT 的实用方法是在直流侧增加 Crowbar 电路, 通过快速吸收故障情况下直流母线的不平衡能量来实现。很多文献都采用 Crowbar 电路实现 LVRT^[7-9], 但对电路中储能元件选择、容量计算及具体的控制方法都没有做深入的研究。

本文提出一种基于固态变压器^[10-11]结构的永磁风电系统, 以超级电容为储能元件构成 Crowbar 电路, 采用同步坐标变换下的正负序电压定向控制策略, 实现不对称故障下的 LVRT 功能, 构建了一种全新的具备良好 LVRT 能力的永磁风电并网系统。

1 风电系统模型及 LVRT 要求

1.1 新型风电并网系统结构

如图 1 所示, 自然界的清洁风能通过风力机转换成机械能, 驱动永磁同步发电机输出电能。发电机定子侧输出的交流电通过 PWM 整流器转换为低压直流, 再通过单相全桥逆变器调制成高频交流, 然后通过高频变压器升压, 经单相全桥整流器还原为直流, 并网 PWM 逆变器将高压直流电转换成恒频恒压的交流电, 经由线路等效电感输送至电网。直流侧采用超级电容构成 Crowbar 电路实现 LVRT 功能。

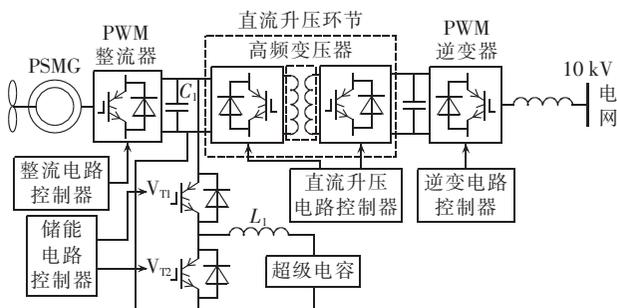


图 1 基于固态变压器的永磁同步风力发电并网系统
Fig.1 A grid-connected PMSG wind power system based on solid state transformer

收稿日期: 2013-03-21; 修回日期: 2013-11-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (0800-219169); 上海市自然科学基金资助项目 (13ZR1444400); 上海市科委重大专项资助项目 (13DZ1200403)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (0800219169), Shanghai Natural Science Foundation (13ZR1444400) and the Program of Shanghai Science and Technology Commission (13DZ1200403)

该系统的特点是,在常规的风电系统变流器结构中加入高频变压器,形成固态变压器结构,实现整流和逆变电气隔离的同时,使并网电压升高至 10 kV,大幅度减小并网电流,有利于减小风电的间歇性对电网的频繁冲击,对提高电网对风电的消纳能力十分有利。随着高电压、大容量 IGBT 器件的不断推出,基于固态变压器技术的高压风电并网系统将得到更多的关注与研究。

1.2 风电系统的 LVRT 要求

根据 2009 年 12 月 22 日颁布的国家电网公司企业标准 Q-GDW392—2009《风电场接入电网技术规定》第 8 章规定,风电场 LVRT 要求如图 2 所示,图中 t 为电压跌落时间, U/U_N 为跌落深度。

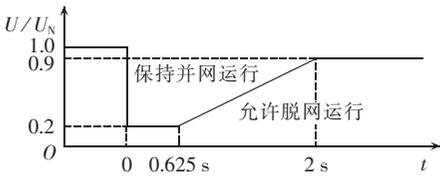


图 2 风电场的低电压穿越要求
Fig.2 LVRT requirement of wind farm

对不同故障类型引起的并网点电压跌落,要求风电场具备以下运行能力。

- a. 三相短路故障引起并网点电压跌落,当各线电压位于曲线上方时,风电机组必须保持并网运行;当任一相电压位于曲线下方时,允许风电机组脱网。
- b. 单相接地故障引起并网点电压跌落,当各相电压位于曲线上方时,风电机组必须保持并网运行;当任意一相电压位于曲线下方时,允许风电机组脱网。
- c. 两相短路故障引起并网点电压跌落,当各线电压位于曲线上方时,风电机组必须保持并网运行;当任一相电压位于曲线下方时,允许风电机组脱网。

2 基于超级电容的 Crowbar 电路

2.1 超级电容模型

超级电容采用活性炭多孔电极和电解质组成双电层结构,将电能存储在双电层中,是一种介于物理电容器和蓄电池之间的理想短期储能元件^[12-13]。它是一种复杂网络,具有复杂的物理特性,可以用分布式参数来描述其数学模型,常用的超级电容二分支模型如图 3 所示。

图中, C_F 为可变电容,由一个恒值电容和一个电容值与超级电容静置端电压成正比的可变电容组

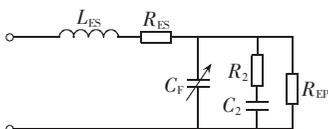


图 3 超级电容的二分支电路模型
Fig.3 Two-branch circuit model of super capacitor

成; $C_F = C_0 + kU$; R_{ES} 为等效串联电阻,表征充放电过程中的能量损耗; R_{EP} 为等效并联电阻,表征超级电容器的漏电流情况,也称为漏电电阻。超级电容自放电时间通常长达数十个小时,所以在工程应用中, R_{EP} 的影响可以忽略。包含 C_F 的主分支反映超级电容充放电时能量的变化;由 R_2 和 C_2 构成的第二分支反映电容内部能量在中长期发生转移的现象。电路中的等效串联电感 L_{ES} 表现超级电容的脉冲响应特性,电感值很小,绝大多数应用中可以忽略不计^[14]。

本文中的超级电容主要用于系统故障时直流母线的能量快速平衡,时间按照秒级考虑,并不涉及第二分支中的能量转移,因此采用简化等效电路,也称为经典模型,如图 4 所示。

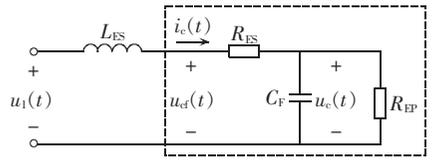


图 4 超级电容的经典电路模型
Fig.4 Typical circuit model of super capacitor

2.2 超级电容的充放电特性分析

由图 4 可得电压、电流之间的关系式:

$$\begin{cases} u_1(t) = L_{ES} \frac{di_c(t)}{dt} + R_{ES} i_c(t) + u_c(t) \\ R_{EP} C_F \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) - R_{EP} i_c(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

若不计等效电感 L_{ES} 的影响,设充电电流为 i_{cf} ,可得:

$$u_{cf}(t) = i_{cf}(R_{ES} + R_{EP}) + (u_c(0) - i_{cf} R_{EP}) e^{-t/(C_F R_{EP})} \quad (2)$$

其中, $u_c(0)$ 为电容的初始电压。

根据图 2 所示的 LVRT 要求,可以计算出在电压跌落期间直流母线两侧产生的能量差值,按最严重的三相短路情况计算:

$$E_{LVRT} = \int_0^2 \Delta P dt \quad (3)$$

其中,积分时间指电压跌落未脱网时间。

再对应图 2 的数据,可得到:

$$E_{LVRT} = P_N [(1 - 0.2) \times 0.625 + 0.5 \times (0.8 + 0.1) \times (2 - 0.625)] \quad (4)$$

其中, P_N 为额定并网功率; ΔP 为电压跌落期间并网功率与额定并网功率的差值。

而超级电容的理想储能容量为:

$$E_{CF} = 0.5 C_F U_w^2 \quad (5)$$

其中, U_w 为超级电容的工作电压。

由此可以计算出超级电容的取值范围。由于超级电容本身物理结构十分复杂,实际应用中,数量众多的电容单体串并联会引起各种损耗,并考虑电网故障在一段时间内多次发生的可能,因此,实际的电容值应在理论计算值的基础上乘以一个较大的可靠

系数,以保证超级电容能可靠地吸收直流母线上多余的能量,保持直流母线电压的稳定。

根据图 1 风电系统的配置参数,本文 Crowbar 电路中的超级电容选择 50 F、540 V,实际电路由 200 个 10000 F、2.7 V 的单体串联而成。根据图 4 所示的经典等效电路分析其充放电特性,仿真时间 20 s,结果如图 5 所示。

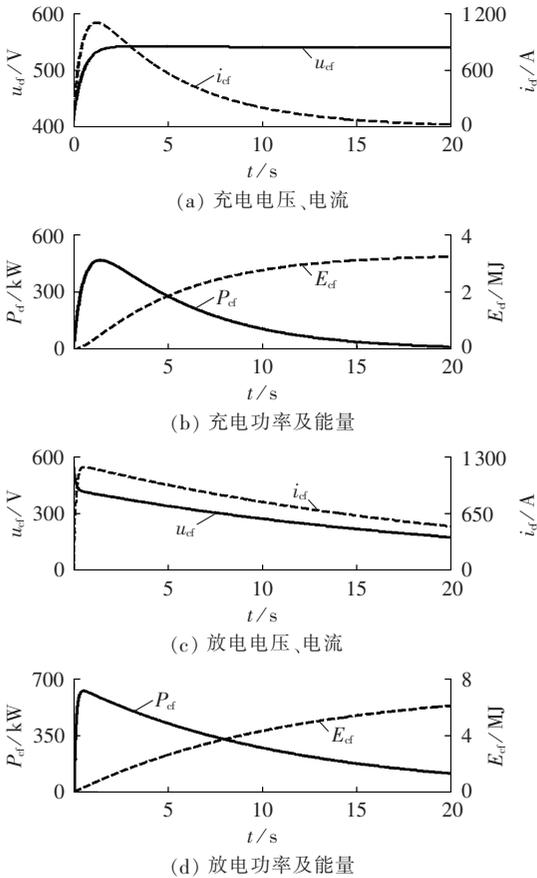


图 5 超级电容器的充放电特性
Fig.5 Charge/discharge characteristics of super capacitor

仿真分析表明,超级电容的充放电过程十分迅速,充电及放电电流均小于 1200 A。大约在 1 s 时充电功率达到最大值,总计充电能量达到 3.6 MJ,而在电网电压跌落期间,由于并网功率减小而导致在直流母线两侧产生的不平衡能量总和约为 1.2 MJ,在超级电容的充电能量范围以内,因此该超级电容能够有效吸收直流母线上的多余能量,使直流电压维持在稳定值,从而不影响整个系统的正常运行。

2.3 Crowbar 电路的控制

采用超级电容的 Crowbar 电路如图 6 所示。

双向半桥 Buck-Boost 电路的工作模式由直流母线两端功率的不平衡状况决定。设发电机发出的功率为 P_s ,系统输出的并网功率为 P_g 。稳态时, P_s 与 P_g 近似相等,电路不投入工作;当 $P_s > P_g$ 时, V_{T1} 触发,电路工作于 Buck 模式,超级电容吸收能量;当 $P_s < P_g$

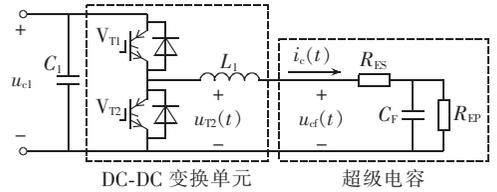


图 6 采用超级电容的 Crowbar 电路
Fig.6 Crowbar circuit with super capacitor

时, V_{T2} 触发,电路工作于 Boost 模式,超级电容释放能量。在实际应用中,可以用母线电压的变化作为功率变化的判据,控制框图如图 7 所示。

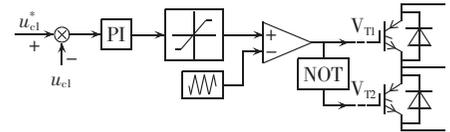


图 7 Crowbar 电路的控制框图
Fig.7 Block diagram of Crowbar circuit control

3 并网逆变器的控制

3.1 电压定向矢量控制

并网逆变器的控制目标为:保持直流母线电压恒定;实现有功功率和无功功率的解耦控制。其模型表示为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -R i_d + \omega L i_q + u_{gd} - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -R i_q - \omega L i_d + u_{gq} - u_q \end{cases} \quad (6)$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_d + S_q i_q) - i_{dc} \quad (7)$$

其中, L 、 C 、 R 分别为并网逆变器的滤波器等效电感、电容和电阻, u_{dc} 和 i_{dc} 分别为低压直流侧电压和电流, u_d 、 u_q 分别为并网电压的 d 、 q 轴分量, u_{gd} 、 u_{gq} 为电网电压 u_g 的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 为并网电流的 d 、 q 轴分量; ω 为电网角频率; S_d 、 S_q 为开关函数。

风电机组馈入电网的有功和无功功率为:

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} (u_{gd} i_d + u_{gq} i_q) \\ Q_g = \frac{3}{2} (u_{gd} i_q - u_{gq} i_d) \end{cases} \quad (8)$$

令 d 轴定向于电网电压矢量,将直流侧电压误差送入 PI 控制器,输出 i_d^* 为参考值,控制输出有功功率,无功功率设定为 0,使系统运行在单位功率因数状态。得到逆变器的双环解耦控制框图见图 8。

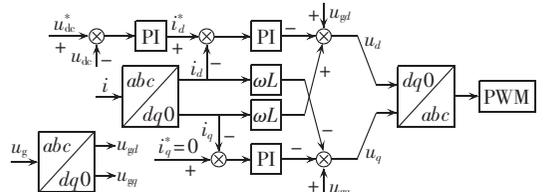


图 8 电网侧逆变器的解耦控制图
Fig.8 Decoupling control of grid-side inverter

3.2 正负序电压定向矢量控制

当风电并网点的电压发生不对称跌落时,直流母线电压将产生 2 次纹波,并网电流产生 3 次谐波。而直驱式永磁风电系统通常采用三相无中性线并网,零序分量不能以中性线为通路。因此三相不平衡电压和电流可用对称分量法分解成正序和负序分量,而不存在零序分量。分解后的正序和负序分量分别对称,可分别控制。

风电系统的功率传输方程为:

$$\begin{cases} P_C = \frac{1}{2} C \frac{du_{dc}^2}{dt} \\ P_s - P_g = P_C \\ P_g = P_0 + P_1 \cos(2\omega t) + P_2 \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

其中, P_C 为电容的充放电功率; P_s 为发电机的输出功率; P_g 为并网功率, P_0 、 P_1 和 P_2 分别为并网有功功率的稳态分量、2 次谐波余弦和正弦量的峰值。

不对称故障下,风电系统传输的功率中存在 2 次谐波分量, P_1 、 P_2 不为 0,从而引起直流母线电压 2 倍工频波动,继而影响发电机侧的正常运行。需要采用不同于对称故障的控制方法,令功率方程式(9)中的 $P_1=0$ 、 $P_2=0$ 。

由文献[2,6,15],将不对称电压和电流作正负序分解,得到正序与负序同步旋转坐标系下的电压方程:

$$\begin{cases} u_d^p = -R i_d^p - L \frac{di_d^p}{dt} + j\omega L i_q^p + u_{gd}^p \\ u_q^p = -R i_q^p - L \frac{di_q^p}{dt} - j\omega L i_d^p + u_{gq}^p \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_d^N = -R i_d^N - L \frac{di_d^N}{dt} - j\omega L i_q^N + u_{gd}^N \\ u_q^N = -R i_q^N - L \frac{di_q^N}{dt} + j\omega L i_d^N + u_{gq}^N \end{cases} \quad (11)$$

其中,上标“P”、“N”分别表示正序、负序。

将电网电压定向控制策略引入正负序网络,在正序网络中令 d^p 轴定向于正序电压方向,在负序网络中令 d^N 轴定向于负序电压方向^[6],得到逆变器的电流给定与功率输出的关系:

$$\begin{bmatrix} i_d^{p*} \\ i_q^{p*} \\ i_d^{N*} \\ i_q^{N*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3D} \begin{bmatrix} U_m^p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -U_m^p \\ -U_m^N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_m^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ 0 \\ 0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $D = (U_m^p)^2 - (U_m^N)^2$, U_m^p 、 U_m^N 为正序、负序电压幅值。

由此得到正负序电压定向矢量控制框图如图 9 所示。

4 仿真分析

4.1 系统参数和仿真工况

在 MATLAB/Simulink 环境下建立图 1 所示风电

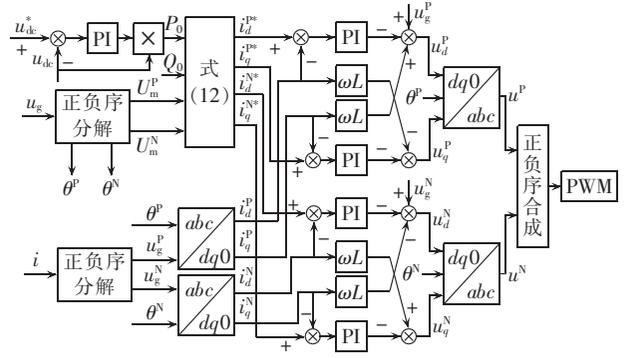


图 9 正负序电压定向矢量控制原理图
Fig.9 Schematic diagram of positive/negative voltage oriented vector control

系统的仿真模型,系统参数如下:对于风力机,额定风速 12 m/s,桨叶半径 31 m,额定转速 20 r/min,最佳叶尖速比 5.6,风能利用系数 0.33;永磁发电机,额定功率 1 MW,发电机端线电压 690 V,永磁体磁链 6.27 Wb,极对数 48,定子 d 、 q 轴电感 $L_d = L_q = 2$ mH,转动惯量 2.5×10^4 kg/m²;对于系统,直流母线电压 $u_{cl} = 1200$ V、 $u_{dc} = 1.8 \times 10^4$ V,并网线电压 $u_g = 10$ kV;对于超级电容器,等效电容 $C_F = 50$ F,等效串联电阻 $R_{ES} = 0.1 \Omega$,等效并联电阻 $R_{EP} = 2 \times 10^4 \Omega$ 。

三相电压对称跌落时,对比仿真 Crowbar 电路接入前后风电系统的直流电压、并网电流和功率的变化情况,验证 Crowbar 电路控制效果和能量消纳性能。

电压不对称跌落时,分别对单相跌落和两相跌落 2 种情况进行仿真。并对比了三相电压平衡控制策略和正负序电压定向控制策略下 LVRT 的实际效果。

4.2 三相电压对称跌落

4.2.1 未接入 Crowbar 电路时的工况

风电系统直流侧未加储能电路时,仿真结果如图 10 所示,图中 u_g 、 u_{cl} 为标么值,系统对称,交流电压只取 a 相说明。

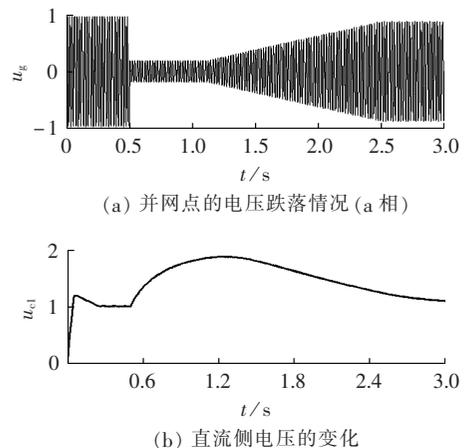


图 10 未加 Crowbar 电路时的相关波形
Fig.10 Waveforms without Crowbar circuit

由仿真结果可知,并网点电压跌落期间,直流侧电压上升幅度较大,近于 2 倍额定值。

4.2.2 接入 Crowbar 电路后的工况

为了提高风电系统的 LVRT 能力,在直流侧增加图 6 所示由超级电容组成的 Crowbar 电路。在同样的运行条件下仿真结果如图 11 所示,图中 u_{cl} 、 u_g 、 i_g 、 P_g 为标么值。

仿真结果表明,电网电压跌落期间,并网电流不

超过 1.5 p.u.,直流电压维持在 1.1 p.u. 以内,超级电容从初始电压 400 V 开始充电,充电电流峰值约为 800 A,0.5 s 电网电压跌落至 20% 额定值,并网功率减小。在后续的仿真中,均采用图 6 所示 Crowbar 电路,重点比较 2 种控制策略的效果。

4.3 单相电压跌落

仿真结果表明,并网点发生单相电压跌落时,仅靠逆变器出口的支撑电容就可以平抑直流母线的功率波动,超级电容构成的 Crowbar 电路不需要投入工作,风电系统即可继续并网运行。

采用传统的逆变器控制方式时,不能对负序电流实现无差调节,直流母线电压出现明显的 2 次纹波,并网电流有较大的 3 次谐波分量。采用了正负序电压定向的控制方法后,直流电压的 2 次纹波得到了很好的消除,并网电流的谐波也得到了明显的抑制。具体仿真结果如图 12 所示,图中 u_{cl} 为标么值,幅值

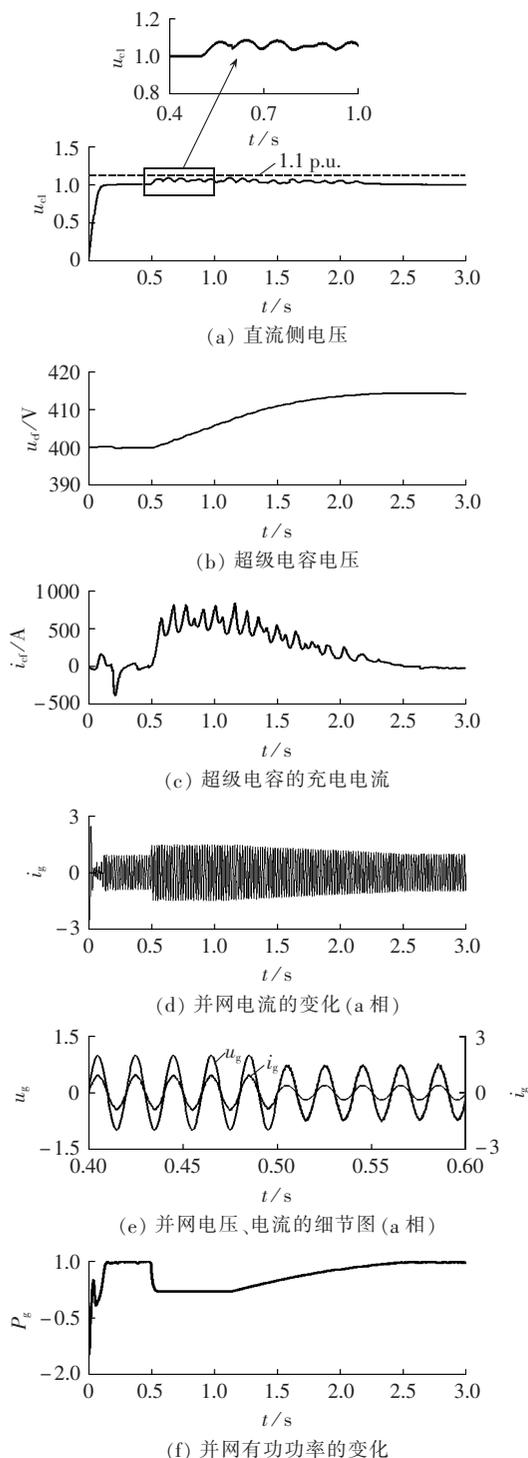
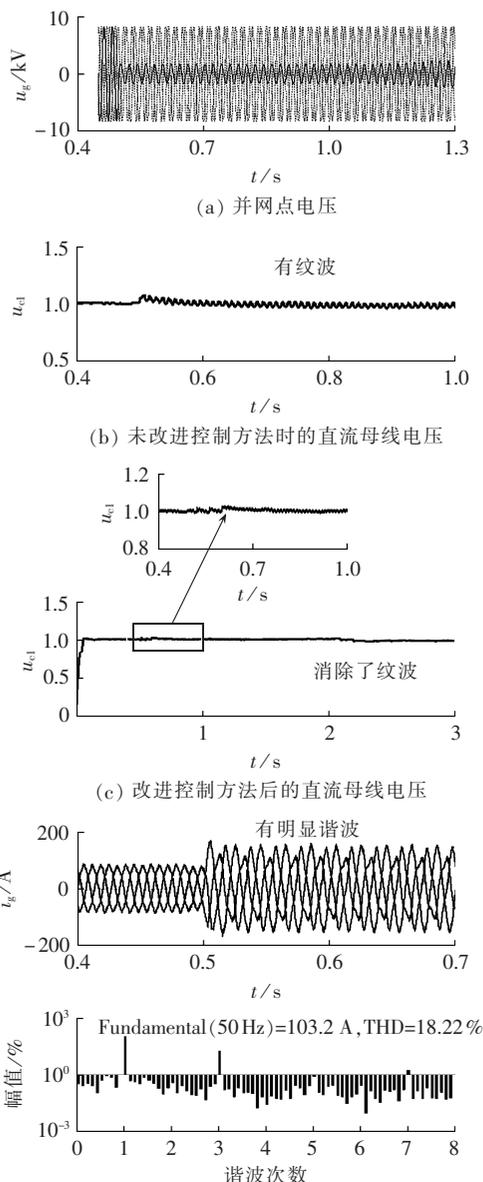


图 11 增加 Crowbar 电路时的相关波形
Fig.11 Waveforms with Crowbar circuit



(d) 未改进控制方法时的并网
电流及其 FFT 分析

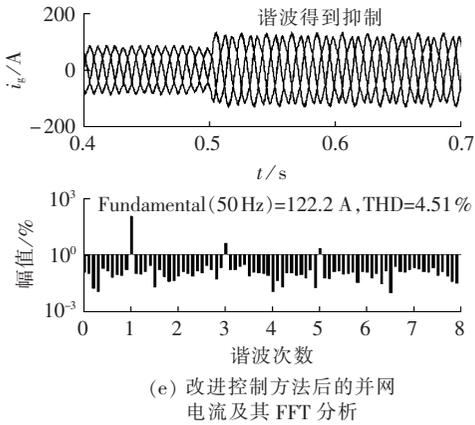


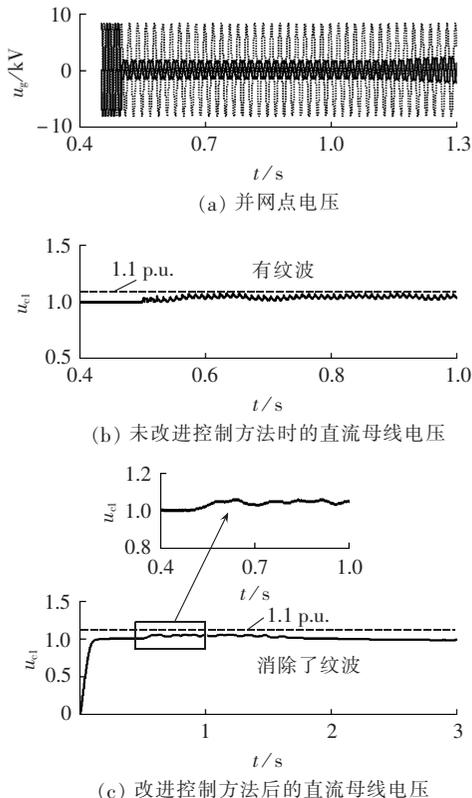
图 12 单相电压跌落时的相关波形

Fig.12 Waveforms during single-phase voltage drop

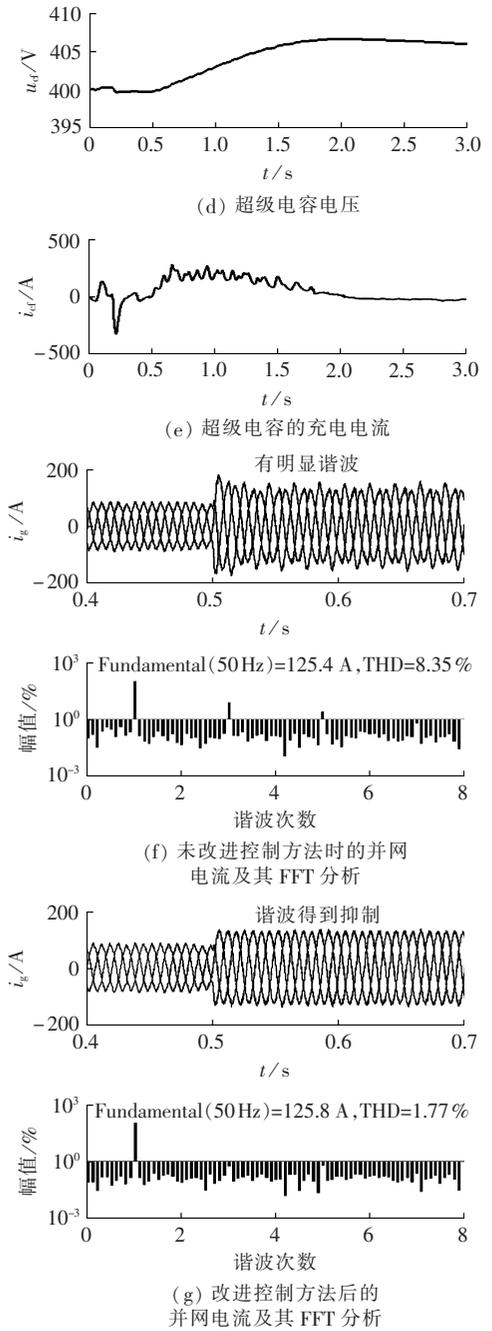
为占基波百分比。

4.4 两相电压跌落

发生两相电压跌落时,超级电容构成的 Crowbar 电路投入工作,使直流侧电压维持在 1.1 p.u.以内,实现了 LVRT 功能。超级电容的充电电流峰值约为 300 A,比三相电压跌落时的充电电流小很多。与单相电压跌落相似,采用传统的电网电压定向控制时,直流母线电压同样出现明显的 2 次纹波,并网电流中有 3 次谐波分量,采用了正负序电压定向控制方法后,2 项指标均得到明显改善。定量分析表明,相比于单相电压跌落,两相电压跌落所引起的母线电压纹波和并网电流谐波均有所减弱,这也符合对称分量的推导结果。图 13 给出了对比仿真波形,图中



(c) 改进控制方法后的直流母线电压



(f) 未改进控制方法时的并网电流及其 FFT 分析

(g) 改进控制方法后的并网电流及其 FFT 分析

图 13 两相电压跌落时的相关波形

Fig.13 Waveforms during two-phase voltage drops

u_{c1} 为标么值,幅值为占基波百分比。

5 结语

本文将超级电容的经典模型应用于风电系统 LVRT 电路的分析,并给出基于电容充放电特性的超级电容容量计算方法。建立了基于固态变压器结构的永磁同步风电系统仿真模型,逆变器并网控制采用正负序电压分别定向控制策略。仿真研究表明,所提出的 LVRT 电路的参数选择合理,控制方法有效,所设计的风电系统具备可靠的 LVRT 能力。

本文所提出的基于超级电容的 LVRT 功能分析与计算方法对大容量风电并网系统的理论研究与工

程设计都具有参考意义。

参考文献:

- [1] 李建林,徐少华. 直接驱动型风力发电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):29-33.
LI Jianlin,XU Shaohua. Control strategy of low-voltage ride-through for direct-drive wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):29-33.
- [2] 黄守道,肖磊,黄科元,等. 不对称故障下直驱永磁风力发电系统网侧变流器的运行与控制[J]. 电工技术学报,2011,26(2):173-180.
HUANG Shoudao,XIAO Lei,HUANG Keyuan,et al. Operation and control on the grid-side converter of the directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(2):173-180.
- [3] 赵紫龙,吴维宁,王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):87-91.
ZHAO Zilong,WU Weining,WANG Wei. A low voltage ride through technology for direct-drive wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(21):87-91.
- [4] XIAO Lei,HUANG Shoudao,LIU Ting,et al. A novel SVM-DPC control method for grid connected AC-DC converters under asymmetrical fault[C]//2011 International Conference on Power Engineering,Energy and Electrical Drives(POWERENG). Malaga, Spain:[s.n.],2011:1-6.
- [5] HE Ziqian,SUN Dan,SHANG Lei,et al. Modified predictive direct power control of voltage-sourced converters under network voltage unbalance conditions[C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Beijing,China:[s.n.],2011:1-6.
- [6] 肖磊,黄守道,黄科元,等. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制[J]. 电工技术学报,2010,25(7):123-129,158.
XIAO Lei,HUANG Shoudao,HUANG Keyuan,et al. DC voltage stability of directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during the asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(7):123-129,158.
- [7] 姚骏,廖勇. 基于Crowbar保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(23):79-83.
YAO Jun,LIAO Yong. Analysis on the operation of an AC excited wind energy conversion system with Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(23):79-83.
- [8] 朱颖,李建林,赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):20-24.
ZHU Ying,LI Jianlin,ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):20-24.
- [9] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):127-130.
MA Wenlong. Application of Crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):127-130.
- [10] 张明锐,刘金辉,金鑫. 应用于智能微网的 SVPWM 固态变压器研究[J]. 电工技术学报,2012,27(1):90-97.
ZHANG Mingrui,LIU Jinhui,JIN Xin. Research on the SVPWM solid state transformer applied in smart micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):90-97.
- [11] BHATTACHARYA S,ZHAO Tiefu,WANG Gangyao,et al. Design and development of generation-I silicon based solid state transformer[C]//2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Palm Springs, CA,USA:[s.n.],2010:1666-1673.
- [12] 李国庆,王鹤,李鸿鹏,等. 微电网中双馈感应风力发电系统控制方法研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):1-7,52.
LI Guoqing,WANG He,LI Hongpeng,et al. Control strategy for DFIG-based wind farm in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):1-7,52.
- [13] 张慧妍. 超级电容器直流储能系统分析与控制技术的研究[D]. 北京:中国科学院电工研究所,2006.
ZHANG Huiyan. Research on the analysis and control strategy of ultra-capacitor DC storage energy system application[D]. Beijing:Institute of Electrical Engineering,Academia Sinica,2006.
- [14] 荀海涛. 能量回收系统中超级电容电压检测与分析[D]. 上海:同济大学,2009.
XUN Haitao. The voltage-detecting and analysis of the energy recycling system[D]. Shanghai:Tongji University,2009.
- [15] 徐金榜,何顶新,赵金,等. 电压不平衡情况下 PWM 整流器功率分析方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(16):80-85.
XU Jinbang,HE Dingxin,ZHAO Jin,et al. A new power analysis method of PWM rectifier with unbalanced voltage condition[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(16):80-85.

作者简介:



张明锐

张明锐(1971-),男,甘肃民勤人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统实时监控技术、分布式发电与微电网(E-mail:zmr@tongji.edu.cn);

黎娜(1987-),女,新疆克拉玛依人,硕士研究生,主要研究方向为应用于智能电网的固态变压器;

王之馨(1984-),女,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电并网技术。

LVRT ability of PMSG wind power system

ZHANG Mingrui,LI Na,WANG Zhixin

(College of Electronic and Information Engineering,Tongji University,Shanghai 201804,China)

Abstract: A grid-connected PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator) wind power system based on solid state transformer is proposed,which applies super capacitor to built Crowbar circuit for LVRT(Low Voltage Ride Through) and adopts the positive/negative sequence voltage oriented control strategy for grid-connected inverter. The charge/discharge characteristics of super capacitor engineering model are researched and the capacity of super capacitor in Crowbar circuit is calculated according to the requirement of LVRT. The voltage difference detection is used in the control of Crowbar circuit to control the charge/discharge of super capacitor according to the requirement of power balance of DC bus. Simulative results show that,the proposed system maintains the DC voltage stable and the grid-connected current sinusoidal under various voltage drop situations.

Key words: wind power; low voltage ride through; super capacitor; Crowbar circuit; charge/discharge characteristics; voltage control; models