

DOI: 10.7667/PSPC170176

基于超级电容蓄能的永磁同步海上风电低电压穿越研究

刘诗涵¹, 周羽生¹, 许振华², 陈辉¹, 刘超智¹, 周顺¹

(1. 智能电网运行与控制湖南省重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114;

2. 福建大唐国际新能源有限公司, 福建 厦门 361008)

摘要: 为避免电网电压跌落导致海上风电机组脱网运行, 分析了直驱永磁同步海上风电系统的双 PWM 全功率变流器控制策略, 提出了一种基于超级电容器蓄能的海上风电机组并网运行低电压穿越方案。在双向变流器的直流侧并联超级电容蓄能系统, 利用超级电容来维持电网故障时的功率平衡, 稳定直流侧母线电压。利用网侧变流器静止无功补偿运行模式控制无功电流输出, 向电网提供无功功率支持。仿真结果表明了该方案在电网故障时, 能有效抑制直流侧过电压, 向电网提供无功功率, 有利于电网故障恢复, 提高了直驱永磁海上风电系统的低电压穿越能力。

关键词: 海上风电; 超级电容蓄能系统; 低电压穿越; 永磁同步发电机

Research on low-voltage ride through capability of permanent magnetic synchronous offshore wind power based on super-capacitor energy storage

LIU Shihan¹, ZHOU Yusheng¹, XU Zhenhua², CHEN Hui¹, LIU Chaozhi¹, ZHOU Shun¹

(1. Smart Grids Operation and Control Key Laboratory of Hunan Province, Changsha University of Science and Technology,

Changsha 410114, China; 2. Fujian Datang International New Energy Company Limited, Xiamen 361008, China)

Abstract: In order to avoid offshore wind turbine off grid operation caused by grid voltage sag, the control strategy of dual PWM full power converter for direct drive permanent magnet synchronous with offshore wind power system is analyzed, a scheme of Low Voltage Ride Through (LVRT) for offshore wind turbines during grid-connected operation is presented based on Super-Capacitor Energy Storage System (SC_ ESS). By paralleling super-capacitor energy storage system on the DC side of the bidirectional converter, this paper uses the super capacitor to stabilize the power balance during the grid fault and ensure the stability of the DC side voltage; it adopts static var compensation operation mode of grid-side converter to prior output reactive current and provide reactive power support to the grid. Simulation results show that under system fault, the presented scheme can efficiently restrain the DC side overvoltage, provide reactive power to the power system, speed up the restoration of power grid fault, and improve the LVRT capability of the offshore wind power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407013).

Key words: offshore wind power; super-capacitor energy storage system; low-voltage ride through; permanent magnet synchronous generator

0 引言

近年来, 海上风力发电以无污染、可持续、平均风速高、风力平稳、各类干扰少、空间广阔和发电量大等优势^[1], 已成为继陆风发电和光伏发电之

后, 绿色能源被利用的又一重大发展趋势。随着欧洲海上风电技术的成熟, 海上风电机组装机容量也逐渐增大, 其运行状态对电网瞬时故障时的功率平衡和电压稳定的影响不容小视。若直接采用机组被迫切出电网来保护海上机组的安全性, 将可能导致电网再一次失去供电源, 引起系统性“电压崩溃”。因此国家电网在最新颁布的《风电场接入电网技术规定(修订本)》中, 着重指出海上风电机组在电网

基金项目: 国家自然科学基金(51407013); 湖南省高等学校创新平台基金资助项目(14K001)

电压瞬间跌落一定范围内不允许脱网运行,并要求在电网电压跌落过程中,有一定能力向电网提供无功功率,调节电网电压,即要求海上风电场具有不同程度的低电压穿越能力(LVRT)。海上风电场的低电压穿越应符合以下规定,当海上风电场并网点电压仅跌落幅度小于等于 80%且持续时间不大于 0.625 s,或者电压在跌落后 2 s 内能重新恢复到额定电压的 90%~100%时,海上风电机组须运行在并网状态^[2],如图 1 所示。

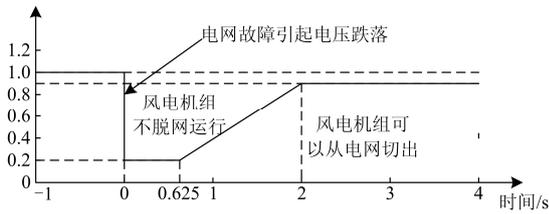


图 1 我国海上风力发电低电压穿越标准
Fig. 1 Low-voltage ride through standards for offshore wind power generation in China

低电压穿越能力对海上风机提出了新的挑战,目前海上风电领域主流的发电机包括定速异步发电机(Fixed Speed Induction Generator, FSIG)、双馈异步发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)、永磁同步发电机(Permanent Magnetic Synchronous Generator, PMSG)^[3]。通过比较三种海上典型风机,就实现 LVRT 要求和功率控制的灵活性而言,永磁同步发电机组通过全功率变流系统与电网直驱相连,省去了齿轮变速箱,具有小损耗、高效率、较低维修成本、调速范围宽等优点^[4],在电网电压跌落时,比双馈异步发电机更容易实现解耦,绕组结构更为简单,不会直接影响到风机的运行特性且易于控制,拥有不错的低电压穿越能力。

近年来,针对永磁同步海上风电系统低电压穿越面临的难点,国内外专家学者对其进行了深入的研究,并取得了一系列成就。归纳为两种方案:(1)控制策略的改善;(2)添加额外元件与变流器协调控制。文献[5-6]提出了直流链并联耗能 Crowbar 电路保护方案,提高了 LVRT 能力,在深度低电压跌落时,并联电路消耗能量与直流链多余能量的平衡有待解决;文献[7]提出超导储能提高 LVRT 能力;成本问题有待解决;文献[8]提出有功无功协调控制缓解电网电压跌落,可以为电网恢复起到辅助作用;文献[9]提出机侧有功前馈于网侧内环有功给定,加快调节控制速度,能抑制直流链电压波动;文献[10]提出紧急变桨技术协调直流链电容容量增大的控制策略;文献[11]提出利用轻型直流输电并改变变流器

拓扑结构来提高海上风电场的 LVRT 能力的方法,这种技术尚未成熟,只有理论的分析,没有应用在实际中的例子,需要进一步深入研究。

本文提出了一种基于超级电容器蓄能的海上直驱永磁同步风力发电系统的低电压穿越方案。在双向变流器的直流链并联超级电容蓄能系统中,利用超级电容来维持电网故障时的功率平衡,稳定直流链母线电压;利用网侧变流器静止无功补偿运行模式定位并控制输出无功电流,向电网提供少量无功功率支持。通过仿真显示,该方案能有效抑制直流侧电压,一定程度上增强直驱永磁同步海上风电系统低电压穿越能力。

1 系统结构与模型

1.1 海上风电系统拓扑图

图 2 是直驱永磁同步海上风电系统的基本拓扑结构示意图。该系统主要由海上风力机、PMSG、双向 PWM 可控变流器(包括机侧 AC/DC 整流器和网侧 DC/AC 逆变器)、传动系统、并联超级电容器蓄能系统构成。

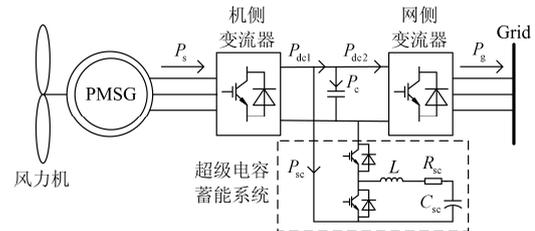


图 2 带超级电容蓄能系统的直驱永磁同步风力发电系统
Fig. 2 Direct-driven permanent magnet synchronous wind power generation system with super capacitor energy storage system

工作原理如下:海上风机与发电机转子直接耦合,叶片捕获风能转换成机械能后,带动 PMSG 转子非周期旋转,使 PMSG 将捕捉的风能转换成频率和幅值随风速呈非周期性变化的电能;全功率变换器通过两个变流器将电网和发电机隔开,使发电机的转速不受电网频率等条件的约束。机侧变流器随风速变化不断调节 PMSG 转速,控制其输出功率最大化利用;网侧变流器对传递到电网的功率进行解耦控制,超级电容蓄能系统并联在直流链,当电网故障导致电压控制失效后,起到快速蓄能或消耗多余能量以解决直流链电压过高或过低产生的能量不匹配问题的作用。

1.2 直流环节数学模型

系统网络功率流向如图 2 所示,设 P_s 为海上风

力发电机输出的功率, P_g 为流入电网的功率, P_{dc1} 为机侧变流器输出的功率, P_c 为忽略电容内部损耗条件下流入电容中的能量, P_{dc2} 为网侧变流器输入的功率, P_{sc} 为直流链流向超级电容蓄能系统的能量, 在系统正常运行时理论上等于零。在忽略线损和功率器件损耗的情况下, 可得

$$P_c = \frac{1}{2} C \frac{d}{dt} U_{dc}^2 = P_{dc1} - P_{dc2} - P_{sc} \approx P_s - P_g - P_{sc} \quad (1)$$

1.3 双 PWM 变换器数学模型

目前大型海上风力发电系统中的永磁发电机与变流器存在多种匹配关系, 主要包括不可控整流+Boost 升压+PWM 逆变器、二极管嵌位型组合变流器、矩阵式变流器和全容量双 PWM 背靠背可控变流器等。本文采用的是实际运用中最为常见的三相电压型双 PWM 背靠背可控变流器, 图 3 为全容量变流器网侧拓扑结构模型, 机侧原理类同。

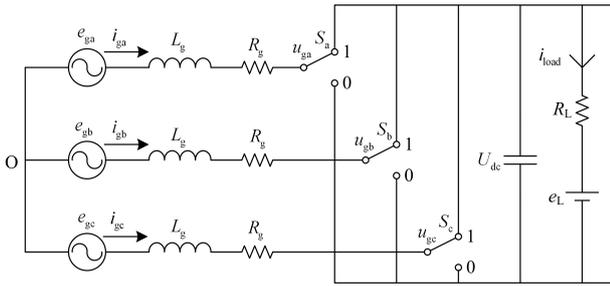


图 3 网侧变流器拓扑结构

Fig. 3 Grid side converter topology

定义二值(0、1)逻辑开关函数 S_k 以便于分析计算, 如式(2)所示。

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂通, 下桥臂断} \\ 0 & \text{下桥臂通, 上桥臂断} \end{cases} \quad (k=1,2,3) \quad (2)$$

假设网侧 LCL 交流滤波器用单电感 L_g 表示, 将功率开关的管损耗等效电阻和网侧进线电阻合并, 令为 R_g , 忽略电网电势波动, 不考虑电感饱和, 依据 KVL 定律得

$$L_g \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - R_g \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} U_{dc} \quad (3)$$

1.4 超级电容等效模型

选择超级电容作为蓄能原件, 主要是因为其充放电速度快、功率密度大、温度特性好、单位时间释放能量大、受环境温度影响小、寿命长、维护方

便、节能环保以及易于测量等特点。由于超级电容的物理特性十分复杂, 蓄能过程中每个单体的多孔电极都会呈现出不同的工作特性。为便于分析, 忽略低频下作用不明显的电感和漏电流, 只考虑瞬时动态响应, 由串联理想电容 C_{sc} 和等效电阻 R_{sc} 组成简化经典模型, 如图 4 所示^[12]。



图 4 超级电容简化经典模型

Fig. 4 Simplified classical model of super capacitor

R_{sc} 是超级电容内部不可忽略的内阻, 反映了其工作在充放电状态时的能量损耗, C_{sc} 由式(4)确定。

$$C_{sc} = \frac{2E_{LVRT}}{\Delta u \cdot U_N} \quad (4)$$

式中: Δu 和 U_N 分别为超级电容的电压变化和额定电压; E_{LVRT} 为 LVRT 时储存在蓄能系统的能量, 由电网电压跌落剩余值和持续时间决定。

2 控制策略

2.1 机侧整流器控制策略

机侧 PWM 变流器将输入的交流电能形态转换成直流电能形态, 通过调节发电机的励磁转矩以保持风机最佳叶尖速比, 从而实现发电机输出功率和电磁功率的精准控制。

PMSG 的电压方程在 dq 旋转坐标下^[13]可如式(5)所示。

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L_{sd} i_{sd} + \omega \psi_f \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为发电机 d 、 q 轴电压和电流; L_{sd} 、 L_{sq} 、 R_s 分别为定子 d 、 q 轴电感和电阻; ω 和 ψ_f 分别为永磁电机同步角速度和转子内部磁链。

采取常用的假设磁链定向, 即 $i_{sdref}=0$ 的双闭环控制策略。外环采用有功闭环 PI 控制, 输出能量 P_s 由定子 q 轴 i_{sq} 给定, 定子 d 轴和 q 轴电流闭环控制由系统内环实现, 图 5 为机侧变流器控制框图。

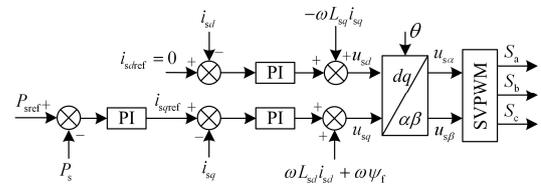


图 5 机侧变流器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of generator side converter

图 5 中, P_{sref} 为永磁电机输出有功功率指令值。在电网正常运行模式下, 由最大风能追踪控制系统 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 获得的输出能量 P_{max} 决定; 在故障模式下, 由 P_{max} 和电网电压共同决定。 P_{max} 由式(6)决定。

$$P_{max} = k\omega^3 - \Delta P \quad (6)$$

式中: $k = \rho A (R/\lambda_{opt}) C_{pmax}^3 / 2$, ρ 为空气密度, A 为叶轮旋转一个周期扫过的面积, R 为风机叶轮半径, λ_{opt} 为最佳叶尖速度比, C_{pmax} 为由节距角和风速共同决定的最大风能利用系数; ω 为旋转时机械运行角速度; ΔP 为运行时各种损耗之和。

2.2 网侧逆变器控制策略

网侧逆变器的控制目标是实现直流母线电压稳定, 同时对输入电网的有功功率和无功功率进行控制, 实现能量双向流动, 从而提高电网电能质量。本文采用双闭环控制, 内环电流环对无功功率控制, 使电网正常运行时获得最大有功输出, 外环电压环对有功追踪, 从而稳定直流链电压。

在 dq 同步旋转坐标系下, 式(3)可表示为

$$\begin{cases} L_g \frac{di_{gd}}{dt} = -R_g i_{gd} + \omega L_g i_{gq} + e_{gd} - u_{gd} \\ L_g \frac{di_{gq}}{dt} = -R_g i_{gq} - \omega L_g i_{gd} + e_{gq} - u_{gq} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $u_{gd} = S_d u_{dc}$ 、 $u_{gq} = S_q u_{dc}$ 、 i_{gd} 、 i_{gq} 分别为网侧变流器 d 轴和 q 轴 Park 变换后的电压和电流分量。

当电网电压矢量 e 经 PLL 控制后, 定向在同步旋转坐标的 d 轴, 有 $e_{gq} = 0$, $e_{gd} = e_g$, 此时网侧变流器注入功率分别为

$$\begin{cases} P_g = -\frac{3}{2} e_g i_{gd} \\ Q_g = -\frac{3}{2} e_g i_{gq} \end{cases} \quad (8)$$

由上式可以实现无功和有功的解耦控制, 使无功功率 Q 仅与 q 轴电流相关, 有功功率 P 仅与 d 轴电流相关, 控制框图如图 6 所示。

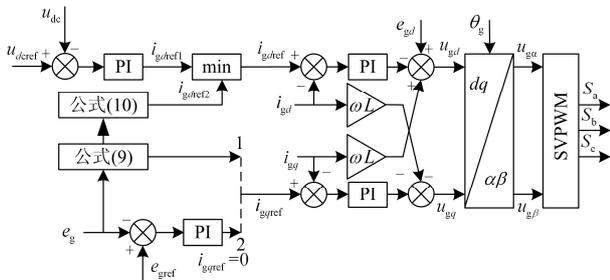


图 6 网侧变流器控制框图

Fig. 6 Control block diagram of grid side converter

为了提高永磁风机低电压穿越能力, q 轴分为静止无功补偿运行模式 1 和单位功率因数运行模式 2。在电网故障至电压跌落超过 10% 时, 式(9)所得值大于零, 网侧变流器在模式 1 静止无功补偿下运行, 优先发出无功功率帮助电网电压恢复; 在正常情况下, $i_{sqref} = 0$, 注入电网的无功功率 Q 为零, 即网侧变流器在模式 2 单位功率因数状态下运行, 只向电网输入最大有功功率。

当电网电压跌落到额定值的 90% 以下时, 根据国网规定的海上风电场动态无功补偿支撑能力要求, 即式(9)可得网侧无功电流参考值, 再通过式(10)对有功电流进行限制, 得到参考值 i_{sdref2} , 与原环路 U_{dcref} 和 U_{dc} 作差后经 PI 控制器得到的 i_{sdref1} 进行比较后取最小值, 得到最终的无功电流参考值 i_{sdref} 。当 $i_{sdref1} < i_{sdref2}$ 时, 表明直流链电压还能被网侧变流器自身调节并维持稳态; 当 $i_{sdref1} > i_{sdref2}$ 时, 说明调节器已经饱和, 网侧变流器不能再起调节作用, 此时需要直流侧超级电容蓄能系统协同网侧变流器进行调节。

$$i_{gq} \geq 1.5 \times (0.9 - e_g) I_N \quad (9)$$

$$i_{gdref2} = \sqrt{i_{max}^2 - i_{gqref}^2} \quad (10)$$

式中, i_{max} 为变流器能接受的最大电流。

2.3 双向 DC-DC 变换器控制策略

超级电容器通过 Buck-Boost 斩波电路并联在直流链, 当直流链上电压超过给定参考值时, 变换器工作在 Buck 模式, 此时超级电容蓄能系统吸收直流链上多余能量并储蓄, 从而降低直流链电压至稳定范围; 反之, 变换器转变到 Boost 模式, 此时超级电容蓄能系统将能量输出至直流链, 从而使直流链电压升高至稳定范围^[14], 最终达到控制直流电压稳定的作用。

如图 7 所示, 变换器采用双环串级控制, 内环为蓄能电流环, 通过与参考值作差辅助提高响应速度; 电压外环对直流链电压进行跟踪稳定。

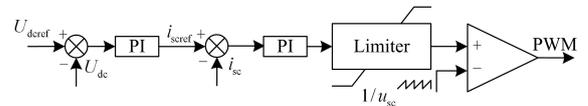


图 7 直流侧变换器控制框图

Fig. 7 Control block diagram of DC side converter

如图 7, 外环将检测到的参考电压 U_{dcref} 与实际电压 U_{dc} 作差, 所得信号通过 PI 调节, 得到内环电流参考值 i_{scref} , 再将 i_{scref} 与实际电流 i_{sc} 作差后, 最终得到的值经 PWM 调制, 得到开关 0 或 1 信号, 从而控制超级电容处于蓄能还是释能状态。两触发

信号必须采取互锁, 不能同时导通, 以防止直流母线短路造成变流器损坏。

3 仿真分析

为验证上述提出的控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 2015 环境下建立了如拓扑图 2 所示的海上风电系统模型。考虑海上风具有湍流强度小、风切变小、风度大等特点, 本文将风速简化后设为恒定值 12.5 m/s , 空气密度为 1.29 kg/m^3 , 风轮半径为 35 m , 桨距角为 0° , 此时最佳叶尖速比为 6.416 , 风能系数为 0.4125 。永磁同步发电机具体参数为: 额定容量 2 MW , 交直流电感 0.85 mH , 定子相电阻 0.78Ω , 转子永磁体磁链 1.375 Wb , 极对数 20 ; 网侧额定电压为 690 V , 滤波 L 和 R 分别为 0.0046 H 、 0.0144Ω , 直流链电容为 0.04 F , U_{dcref} 为 1100 V , 电压外环控制参数 $k_{vp}=96$, $k_{vi}=3000$, 电流内环控制参数 $k_{ip}=0.28$, $k_{ii}=28$ 。超级电容参数为: 额定电压为 600 V , 蓄能等效电容和电阻分别为 1500 F , 0.012Ω 。

由于三相短路故障造成的直流链母线过电压最高, 因此着重研究这种情况。图 8 给出了传统控制策略下的仿真波形图, 即机侧控功率, 采用零 d 轴电流控制策略, 控制外环采用转速控制, 内环采用电流内环; 网侧控直流链电压, 采用电压外环和电流内环双环控制, 变流器采用 1.5 倍限流措施^[15]。从图中可见, 系统在单位功率因数下运行, 网侧无功给定为 0 , 如图 8(a)所示, 电压跌落幅度为 50% , 持续时间为 0.4 s ($0.8 \sim 1.2 \text{ s}$)。在跌落期间, 并网电流会显著增大, 但由于变流器的限流作用, 并网电流会被限制在 1.5 p.u. 左右, 如图 8(b)所示。由于直流链输入能量和输出能量不平衡, 输入能量大于输出能量, 多余能量将会使得直流链电压上升至约 2.7 p.u. (约 3000 V), 如图 8(e)所示。因为电流不可突变, 输出的有功在瞬间跌落至原来的 50% 后马上反弹至 0.75 p.u. , 在电压恢复过程中, 电容放电需要持续一段时间, 所以有功功率在跌落期间会大于额定值, 如图 8(c)所示。

图 9 为带超级电容蓄能的新型控制策略仿真波形图, 系统正常时运行在单位功率因数下, 故障时电压跌落如图 9(a)所示, 跌落幅值 80% , 网侧变流器在静止无功补偿模式下运行, 持续时间 0.625 s ($0.7 \sim 1.325 \text{ s}$)。从图中可见, 在故障期间, 注入电网的有功功率减少, 如图 9(c)所示, 并优先向电网输入无功功率, 如图 9(d)所示, 以支撑电网恢复, 满足了电网要求。当系统恢复时, 网侧变流器又重新转变到原来状态, 向电网提供最大有功能量。由

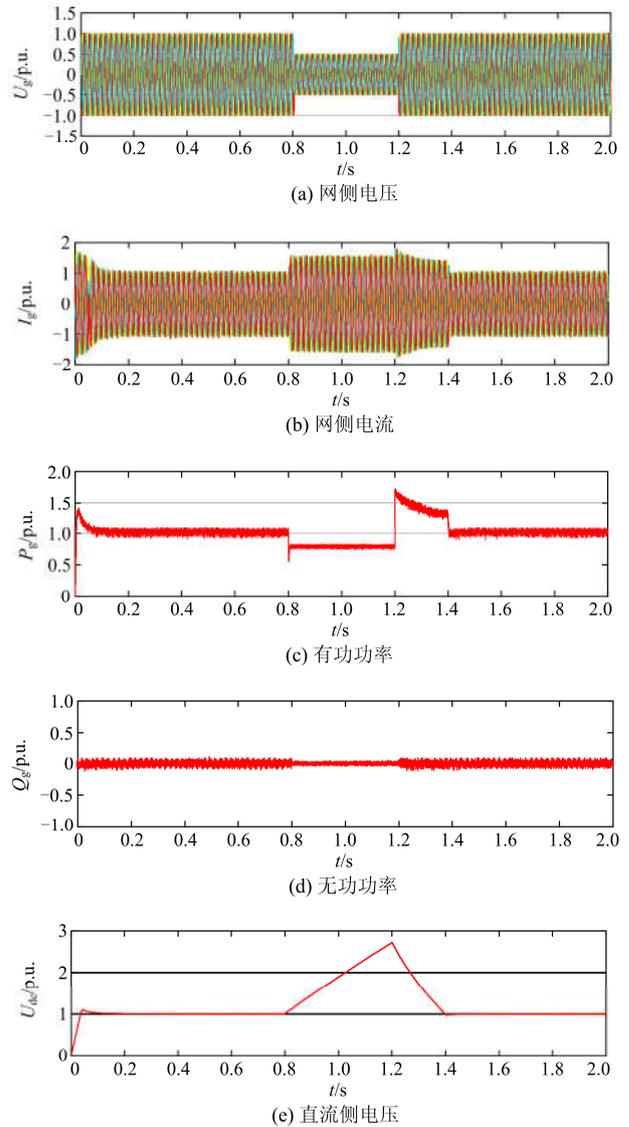
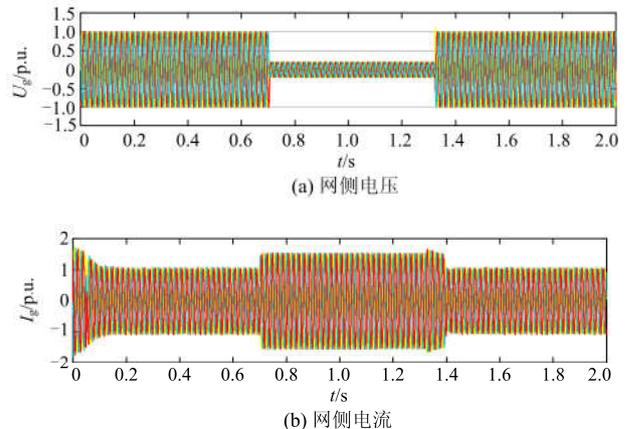


图 8 只采取限流措施的传统控制策略仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the traditional control strategy using only the current limiting measures



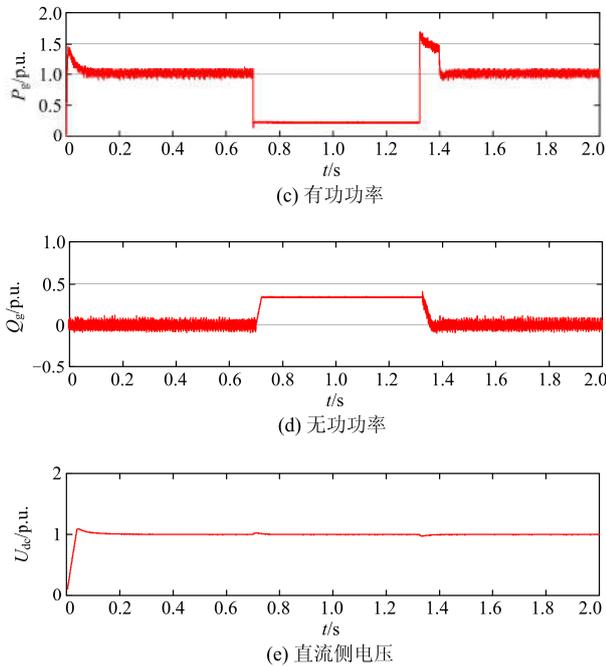


图 9 带超级电容的新型控制策略仿真结果

Fig. 9 Simulation results of a new control strategy with super capacitor

图 9(e)可见, 超级电容吸收的能量与网侧变流器减小的能量几乎相等, 有效地稳定了直流母线电压。

4 结论

本文针对海上永磁直驱风力系统低电压穿越过程中直流链过电压问题, 提出了一种并联超级电容蓄能系统的控制策略, 并在传统的控制策略上, 结合国家电网新规定的海上风电场动态无功补偿支撑能力要求, 建立双通道模式, 对网侧控制策略进行了可行性的优化。实现了利用并联超级电容蓄能系统稳定直流链电压; 利用网侧变流器静止无功补偿模式通道重新分配并优先输出无功电流, 保证电网无功需求。最后对该思路进行了验证, 从验证的结果可以看出, 该方案在电网低电压状态下, 可以有效地抑制直流链的过电压, 期间能向电网提供少量的无功功率, 辅助系统电压迅速恢复至额定值, 避免二次跌落, 为增强海上风力发电系统低电压穿越能力提供了一种新的思路。

参考文献

[1] 张哲. 海上风电场电能传输技术研究[J]. 风能, 2012(5): 60-64.
ZHANG Zhe. Research on electric power transmission technology of offshore wind farm[J]. Wind Energy, 2012(5):

60-64.

[2] 周羽生, 郑剑武, 向军, 等. 双馈风力发电系统网侧变流器联合控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(4): 25-29.

ZHOU Yusheng, ZHENG Jianwu, XIANG Jun, et al. Combination control strategy for grid convert in doubly-fed wind power generation systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4): 25-29.

[3] 刘勇. 相同风速功率下两种风电机组响应电网短路故障的对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 28-34.

LIU Yong. Comparative analysis of DFIG and PMSG capability with same wind speed-power curve response to short circuit fault of power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 28-34.

[4] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89.

WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on the fault ride-through optimal control strategy of PMSG-based wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 83-89.

[5] RAIAMBAL K, CHELLAMUTHU C. Modeling and simulation of grid connected wind electric generating system[C] // 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering, 2002, 3: 1847-1852.

[6] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱风电系统变流器建模和跌落特性仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 949-954.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Modeling on converters of direct-driven wind power system and its performance during voltage sags[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 949-954.

[7] 党存禄, 林国富. 超导储能在并网直驱风电系统中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 48-53.

DANG Cunlu, LIN Guofu. Application research of superconducting magnetic energy storage in grid-connected directly-driven wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 48-53.

[8] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.

LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated

- control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [9] 刘波, 金昊. 永磁直驱风电系统双PWM变换器前馈补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 52-57.
LIU Bo, JIN Hao. Feed forward compensation control of dual PWM converter for permanent magnet direct driven wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 52-57.
- [10] 边晓燕, 田春笋, 符杨. 提升直驱型永磁风电机组故障穿越能力的改进控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 69-74.
BIAN Xiaoyan, TIAN Chunsun, FU Yang. A coordinated control strategy for fault ride-through capacity of direct-drive permanent magnet wind power generating units[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 69-74.
- [11] DU C, BOLLEN M H J, AGNEHBOLM E, et al. A new control strategy of a VSC-HVDC system for high-quality supply of industrial plants[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2386-2394.
- [12] 赵洋, 梁海泉, 张逸成. 电化学超级电容器建模研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 188-195.
ZHAO Yang, LIANG Haiquan, ZHANG Yicheng. Review and expectation of modeling research on electrochemical supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 188-195.
- [13] 严干贵, 魏治成, 穆钢, 等. 直驱永磁同步风电机组的动态建模与运行控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 34-39.
YAN Gangui, WEI Zhicheng, MU Gang, et al. Dynamic modeling and control of directly-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2009, 21(6): 34-39.
- [14] 肖华锋, 谢少军. 一端稳压一端稳流型软开关双向DC/DC变换器(I)—电路原理和控制策略[J]. 电工技术学报, 2006, 21(10): 31-37.
XIAO Huafeng, XIE Shaojun. A ZVS bi-directional DC/DC converter with one port voltage regulated and another port current regulated (I) — circuit principle and control scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(10): 31-37.
- [15] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOES J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.

收稿日期: 2017-02-13; 修回日期: 2017-04-29

作者简介:

刘诗涵(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及并网技术; E-mail: 352364209@qq.com

周羽生(1965—), 男, 研究生导师, 研究方向为电力系统继电保护与配电网自动化、高温超导电力技术、高电压绝缘与监测; E-mail: zysdl0193@sina.com

许振华(1965—), 男, 工程师, 研究方向为风电场的开发、建设、运行维护管理工作。E-mail: xzh@dtzzfd.cn

(编辑 姜新丽)