

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231124

计及阻容式撬棒的混合型风电场协同控制及故障特性分析

冯海洋¹, 束洪春¹, 杨兴雄², 宋建¹, 邓涵¹, 周子超¹, 陈有为¹, 张丕豪¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650500; 2. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为解决混合型风电场低穿措施复杂难以协同及低穿后故障特性难以分析的问题, 提出双馈风电机组应用阻容式撬棒以改善低电压穿越期间混合型风电场的频偏及无功特性。首先建立双馈风电机组群与永磁直驱风力发电机组群模型, 通过分群聚合等效的方法建立混合型风电场简化等效模型。在此基础上, 分析计及阻容撬棒的混合型风电场故障期间各类型风电机组的无功调节能力及调节特性。据此制定混合型风电场的无功协同控制策略以优化低电压穿越期间无功输出能力, 分析采用协同控制策略后混合型风电场的短路特性, 并对短路电流进行解析。最后基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件建立了混合型风电场仿真模型, 对协同策略的有效性 & 故障电流表达式的正确性进行仿真验证。

关键词: 混合型风电场; 短路电流; 阻容撬棒; 协同控制策略

Synergetic control and fault characteristics analysis of hybrid wind farm considering resistance-capacitance crowbar

FENG Haiyang¹, SHU Hongchun¹, YANG Xingxiong², SONG Jian¹, DENG Han¹,
ZHOU Zichao¹, CHEN Youwei¹, ZHANG Pihao¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: There is a problem that the low-voltage ride-through measures of a hybrid wind farm are complex and difficult to cooperate with and the fault characteristics after low-voltage ride-through are difficult to analyze. Thus it is proposed that a resistance-capacitance crowbar is applied to the doubly-fed wind turbine to improve the frequency offset and reactive power characteristics of the hybrid wind farm during low-voltage ride-through. First, the models of doubly-fed wind turbine group and permanent magnet direct-drive wind turbine group are established, and a simplified equivalent model of a hybrid wind farm is established by the method of grouping and aggregating equivalence. Then the reactive power regulation ability and regulation characteristics of various types of wind turbines during a fault in the hybrid wind farm considering the resistance-capacitance crowbar are analyzed. The reactive power cooperative control strategy of the hybrid wind farm is formulated to optimize the reactive power output capacity during low voltage ride-through. The short-circuit characteristics of the hybrid wind farm after adopting the cooperative control strategy are analyzed and the short-circuit current is analyzed. Finally, based on PSCAD/EMTDC simulation software, a hybrid wind farm simulation model is established to verify the effectiveness of the collaborative strategy and the correctness of the fault current expression.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52037003).

Key words: hybrid wind farm; short-circuit current; resistance-capacitance crowbar; cooperative control strategy

0 引言

作为加快推进“双碳”进程的“主力军”，风力发电技术在世界各地得到了大力发展及应用。目前

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52037003); 云南省重大专项资助(202002AF080001)

风力发电主流机型为双馈型风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)与永磁直驱型风力发电机(permanent magnet synchronous generators, PMSG)^[1-3]。前者具有调节响应速度快、有功无功功率解耦控制、变速恒频运行、造价低廉等优点, 而后者无齿轮箱, 具有更高的能量转换效率、更大的单机容量及控制方式简单等优点。风电场的建设存在周期性, 不同

时期的风电机组类型选择会兼顾不同机组类型的特点,并根据当时的建设成本及技术水平灵活选择,因此风电场往往会产生不同类型风电机组混合运行的场面^[4]。混合型风电场可以利用两种风机进行优势互补,从而提高风电场并网稳定性及故障期间风电场的低电压穿越能力^[5]。因两种机型短路电流特性存在较大区别,忽略自身控制策略与风力发电机组类型差异会使风电场短路电流计算产生较大误差,因此有必要对混合型风电场的短路特性进行深入分析。

目前文献针对两种机组组成的风电场短路电流以及两种机型所构成的混合型风电场的研究已经取得一定成果。文献[6-9]分析了双馈风电场的短路电流特性,给出了不同故障类型下双馈风电机组故障电流的表达式及故障期间的无功特性;文献[10]通过双馈风电机组精确计算定转子磁链在故障期间的变化情况,得到撬棒动作时三相短路电流计算方法;文献[11]提出撬棒电路被广泛用作双馈风电机组的故障穿越方案,由于其存在投入后可控性差、吸收无功等固有缺陷,提出了一种不采取撬棒电路的新型故障穿越技术,对新型故障穿越技术的要点及未来发展方向进行讨论与展望;文献[12]提出了一种电阻电容串联的改进撬棒电路结构,这种撬棒电路结构可以改善故障期间双馈风电机组的无功特性;文献[13]结合阻容撬棒电路的优点,给出计及阻容式撬棒电路动作时间的双馈风机短路电流表达式,并验证了阻容式撬棒的有效性;文献[14]提出了一种直驱风机网侧变流器简化处理后的数学模型,对其分析得到直驱风机三相短路电流的近似表达式;文献[15-17]分析了直驱风机低电压穿越措施的作用机理,并通过在网侧换流器(grid side converter, GSC)中应用无功控制策略及双侧换流器系统中增设协调限流控制环节,实现对风电机组有功和无功功率的有效调控,提高了直驱风电机组的低电压穿越能力;文献[18]通过推导双馈风电机组和永磁直驱风电机组的无功电流极限表达式,基于此提出了一种混合型风电场群的无功电流协同控制策略,提高了混合型风电场的低电压穿越能力;文献[19]提出了含多类型风电机组的风电场简化等效模型,给出了混合型风电场短路电流的计算表达式,并在此基础上验证了计算表达式的正确性。

上述研究对双馈风电机组、直驱风电机组及两种机组组成的混合型风电场短路电流进行了分析。然而,目前尚缺乏针对混合型风电场应用阻容式撬棒以全面提升风电场整体低电压穿越能力(low voltage ride-through, LVRT)的相关研究,且现有文献较少涉

及混合型风电场中不同类型机组的协同策略研究,以及应用后混合型风电场的短路电流特性研究。

针对以上问题,本文首先对不同风电机组的故障特性进行分析,进而得出 DFIG 机组应用阻容式撬棒电路以抑制转子浪涌电流,从而改善频率偏移现象和无功特性;然后结合两种不同类型机组的低电压穿越特点,提出计及阻容式撬棒电路投入后的混合型风电场中 PMSG 机组协同控制策略,达到提高混合型风电场整体低电压穿越能力的目的;最后在此基础上分析采用协同策略后混合型风电场短路电流表达式的正确性。

1 混合型风电场并网等效模型

本文建立图 1 所示的混合型风力发电场模型,并作以下简化处理,不考虑风电机组的机械转动过程,对模型中各参数进行集中参数等值。混合型风电场中风电机组类型为 PMSG 机组与 DFIG 机组。PMSG 机组与 DFIG 机组发出的电能汇集至风电场集电线,经集电变压器将电压升高至 35 kV,之后汇集至风电场,通过送入主变压器进一步升高电压,最后经送出线连接至系统电网中。

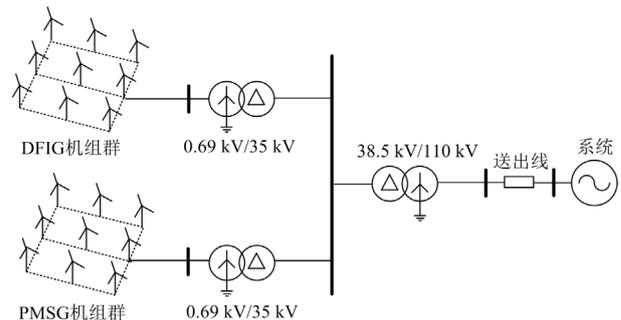


图 1 混合型风电场并网接线图

Fig. 1 Hybrid wind farm grid connection diagram

1.1 混合型风电场不同类型机组聚合等效

当发生混合型风电场故障后,不同类型的风电机组低电压穿越策略并不相同,不同的策略会使机组呈现不同的暂态特性,会对分析带来一定困难^[6]。本文同类型机组采取相同低电压穿越策略,因此在故障期间可以按照机组类型进行分群聚合,并根据单台机组参数得出聚合等效模型。假设混合型风电场装设 n 台容量为 S_1 的双馈风力发电机组与 m 台容量为 S_2 的永磁直驱风力发电机组,对其进行聚合等效,定义混合比例系数为 h , $h = nS_1 / (nS_1 + mS_2)$ 。故障暂态期间双馈风力发电机组仍可以表示为电压源与阻抗串联,内电势 E_{equ} 可由每台双馈风力发电机组计算得到,而故障后暂态内电势与转子磁链

密切相关^[19]。永磁直驱风力发电机组可等效为受控电流源, 其电流 I_{equ} 大小为每台永磁风力发电机组的电流之和。聚合后风电机组等效参数计算公式为

$$\begin{cases} E_{\text{equ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{\text{DFIG}i} \\ Z_{\text{equ}} = Z_{\text{DFIG}1} // Z_{\text{DFIG}2} // \dots // Z_{\text{DFIG}i} \\ I_{\text{equ}} = \sum_{i=1}^m I_{\text{PMSG}i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为双馈风机台数; m 为永磁直驱风机台数; $E_{\text{DFIG}i}$ 为第 i 台 DFIG 机组等效电势; $I_{\text{PMSG}i}$ 为第 i 台 PMSG 机组等效电流 E_{equ} 为双馈风电机组等效后电压源电势; Z_{equ} 为双馈风电机组等效后总阻抗; I_{equ} 为永磁直驱风机机组等效后电流源电流。

充分考虑不同风速对机组的影响, 对 DFIG 机组群与 PMSG 机组群两类机组进行高风速区和低风速区分类, 并对同一风速区间内的风机进行一次等效合并^[20-21]。等效后混合型风电场分群简化等效模型如图 2 所示。

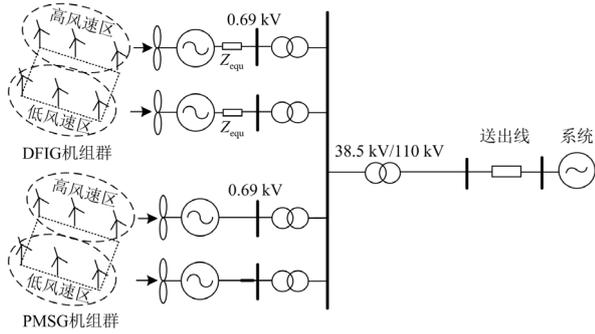


图 2 混合型风电场分群简化等效模型

Fig. 2 Simplified equivalent model for grouping of hybrid wind farm

1.2 混合型风电场无功协同控制分析

当 DFIG 机端出现严重故障时会导致转子侧出现过电流现象。撬棒保护电路的投入可以很好地抑制这种现象, 使双馈风电机组可以顺利地低电压穿越。撬棒电路投入后转子换流器(rotor side converter, RSC)闭锁, 转子电流进入被动衰减过程, 之后进入异步运行阶段。阻容式撬棒会在一定程度上滤除转子电流中的衰减直流分量, 从而在一定程度上滤除定子中感应出的转速频率含量, 改善双馈风机低电压穿越过程中的频率偏移现象, 且由于电容特性还能改善双馈风机低电压穿越过程中的无功特性, 因此本文双馈风机的主要低穿措施为阻容式

撬棒^[9]。对于 PMSG 机组, 当发生电压跌落时, 机端输出功率受限, 机侧换流器(machine side converter, MSC)仍保持最大功率追踪, 使得直流电容电压升高, 此时 PMSG 通过卸荷电阻投切维持直流电压, 从而实现低电压穿越过程, 且故障期间 GSC 可以灵活调节控制目标, 并向电网提供稳定的无功功率支持, 功率因数调节范围通常为 $-0.95 \sim 0.95$ ^[11-12]。

若故障电压跌落程度不足以使 DFIG 撬棒电路投入动作, 此时应考虑 DFIG 的 RSC 仍并网运行, 故障发生后 RSC 可通过调节无功电流指令值使机组满足并网标准中的无功电流要求, 向电网进行无功支撑, 在满足 RSC 限幅的条件下, 通过调节有功电流参考值从而调节机组有功功率。此时 DFIG 与 PMSG 都向外发出无功功率, 两种机组同时进行无功功率支撑帮助混合型风电场完成低电压穿越过程。故本文重点分析故障较为严重的情况, 即 DFIG 撬棒电路投入动作后混合型风电场的协同策略与故障特性分析。

通过对 DFIG 及 PMSG 各自的低电压穿越措施及故障特性进行分析, 可以发现当故障发生后, 由于阻容撬棒电路的投入, DFIG 转子换流器闭锁双馈风力发电机组进入异步运行阶段。而 PMSG 的网侧换流器仍并网运行并处于可控阶段。因此, 在对混合型风电场的无功协同性进行深入分析之前, 首要任务是对 DFIG 机组撬棒电路在投入运行状态下的无功特性进行定量化的探究。

根据发电机惯例, 忽略暂态过程中的磁饱和现象, 并将定、转子电压及磁链转换到 dq 坐标系下, 可得双馈风力发电机模型为

$$\begin{cases} U_s = R_s i_s + j\omega_1 \psi_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ U_r = R_r i_r + js\omega_1 \psi_r + \frac{d\psi_r}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_s 、 R_s 、 i_s 、 ψ_s 分别为定子电压、定子电阻、定子电流及定子磁链; U_r 、 R_r 、 i_r 、 ψ_r 分别为转子电压、转子电阻、转子电流及转子磁链; ω_1 为同步转速; s 为转差率, $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$, ω_r 为转子机械转速; L_s 、 L_r 分别为定、转子等效电感; L_m 为定转子间等效互感。由式(2)及式(3)可得, 阻容式撬棒电路投入后双馈风力发电机等效电路如图 3 所示。

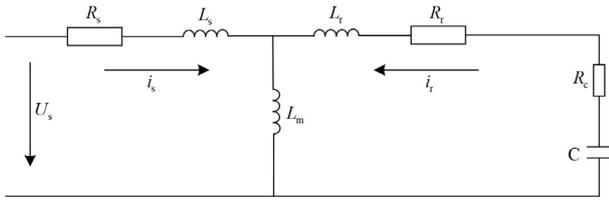


图3 阻容撬棒投入后 DFIG 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of DFIG after resistance-capacitance crowbar being put into operation

根据阻容撬棒投入后双馈风力发电机等效电路图，建立定子侧戴维南等效电路模型，其等效阻抗 Z_{DFIG} 为

$$Z_{DFIG} = R_{eq} + jX_{eq} = R_s + jX_s + jX_m // [(R_r + R_c) + j(X_r + X_c)] \quad (4)$$

将等效电路图 3 中各参数代入式(4)，可以得到等效阻抗为

$$\begin{cases} R_{eq} = R_s + \frac{(R_r + R_c)X_m^2}{(R_r + R_c)^2 + (X_m + X_r + X_c)^2} \\ X_{eq} = X_s + \frac{(R_r + R_c)^2 X_m + (X_m + X_r + X_c)X_m(X_r + X_c)}{(R_r + R_c)^2 + (X_m + X_r + X_c)^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： R_{eq} 、 X_{eq} 分别为故障后双馈风机等效电阻与电抗； X_s 为定子侧等效电抗； X_m 为互感支路等效电抗； X_r 为转子侧等效电抗； R_c 为阻容式撬棒等效电阻； X_c 为阻容式撬棒等效电抗。

忽略暂态电流影响，计算出当阻容撬棒电路投入后，DFIG 机组定子侧吸收的无功功率 Q_s 为

$$Q_s = -\frac{3}{2} U_s'^2 \frac{X_{eq}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (6)$$

式中， U_s' 为故障后定子残压，若电压跌落系数为 k ，则 $U_s' = (1 - k)U_s$ 。

通过式(5)可以分析得出，相比传统撬棒，阻容式撬棒电路可以降低双馈风电机组低电压穿越期间的无功功率吸收量。假设各台双馈风电机组参数相同，即各台双馈风电机组等效阻抗 Z_{DFIGi} 相同，可以通过等值计算得到式(7)所示关系，并以此作为协同控制策略制定的基础。

$$\begin{cases} Z_{sequ} = Z_{DFIGi} / n \\ Q_{sequ} = nQ_s \end{cases} \quad (7)$$

式中， Q_{sequ} 为 n 台 DFIG 吸收无功功率等效总和。

1.3 混合型风电场协同控制策略

根据风电场并网标准：GB/T 19963.1-2021《风电场接入电力系统技术规定 第1部分：陆上风电》

中对风电场低电压期间各指标的要求，故障后风电场应输出动态无功电流增量并响应并网点电压变化，具体表示为^[23]

$$\Delta I_i = k_1(0.9 - U_i)I_N, 0.2 \leq U_i \leq 0.9 \quad (8)$$

式中： ΔI_i 为风电场注入的动态无功电流增量； k_1 为风电场动态无功电流比例系数，一般为 1.5~3； U_i 为风电场并网点电压标么值，由于风电场各风电机组之间线路较短，近似认为并网点电压与风电场母线电压相等； I_N 为风电场额定电流。

结合上述并网标准内容，并充分考虑故障期间双馈风力发电机与永磁直驱风力发电机不同的低电压穿越措施以及不同穿越措施下不同类型机组的无功特性，将本文混合型风电场中 PMSG 的低电压穿越策略设置如下：首先将双馈风电机组的传统撬棒电路结构优化为阻容式撬棒结构，以优化低电压穿越期间双馈风电机组的频偏特性及无功特性；PMSG 机组故障期间断开电压环只保留电流环，并在此基础上增加一个电流指令值计算环节。电流指令值计算模块设计框图如图 4 所示，首先判断机端电压跌落情况并采集机端电压，根据故障期间机端电压跌落情况以及双馈风机撬棒动作情况重新计算 GSC 无功电流指令值。计算过程中对 GSC 附加带有优先级的限幅环节，机组正常并网运行时 MSC 实现最大功率追踪，此时 GSC 应满足优先向电网馈入有功功率，即运行在单位功率因数下。当机端电压发生跌落时，判断直驱风机电压跌落是否大于 0.1 p.u.，限流环节调整为无功优先模式，即应优先满足低电压穿越期间的无功电流要求，并根据无功电流要求重新计算低电压穿越期间 GSC 无功电流指令值，此时 PMSG 机组优先向电网馈入无功功率。本文协同控制策略的核心在于：撬棒类型优化为阻容式，有效地减少 DFIG 机组无功功率的吸收量；定量计算 DFIG 撬棒电路投入后的无功吸收量，并利用 PMSG 支援 DFIG 异步运行期间的功缺额，实现混合型风电场低电压穿越的目的。

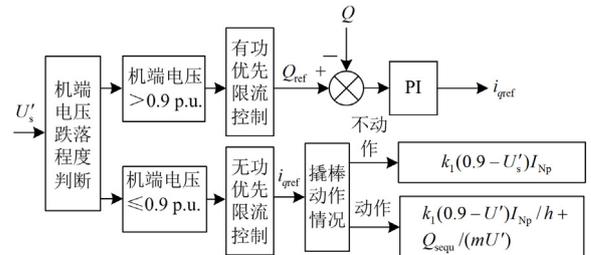


图4 直驱风电机组电流指令值计算框图

Fig. 4 Calculation block diagram of current command value of PMSG

根据前文提出的两种机型低电压穿越策略的优化措施, 可得到混合型风电场具体协同控制措施框

图, 具体如图 5 所示。

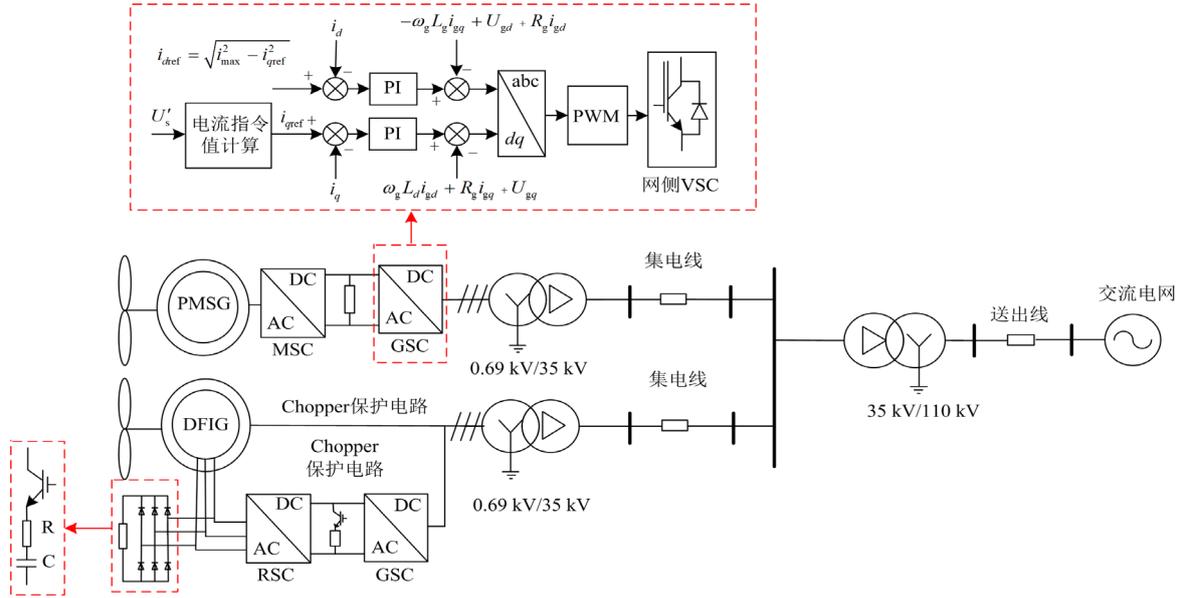


图 5 混合型风电场控制策略

Fig. 5 Control strategy for hybrid wind farm

2 混合型风电场故障特性分析

2.1 阻容撬棒故障特性分析

当 DFIG 机端发生严重故障时, 忽略阻容式撬棒投入时延, 此时定义机端电压跌落系数为 k 。即对 DFIG 机组叠加大小为 $-k$ 倍初始电压的反向电压源 ΔU_s 。根据磁链守恒原理可得故障后定子磁链会产生由故障分量引起的暂态衰减分量以及稳态分量, 暂态分量以定子衰减时间常数进行衰减, 定子磁链的故障分量 $\Delta \psi_s$ 表示为^[24]

$$\Delta \psi_s = \frac{\Delta U_s}{j\omega_1} + \frac{kU_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-t/\tau_s^c} \quad (9)$$

式中, τ_s^c 为定子衰减系数, $\tau_s^c = (R_s L_r^c) / L_D^c$, L_D^c 为撬棒电路投入后 L_D 的等效值, $L_D^c = L_s L_r^c - L_m^2$, L_r^c 为转子电感串联电容后的等效电感。

根据撬棒投入后其等效电路, 故障发生后定子磁链全量为初始量与故障分量叠加, 此时定子磁链 ψ_s^c 可以表示为

$$\psi_s^c = \psi_s + \Delta \psi_s = \frac{U_s}{j\omega_1} + \frac{\Delta U_s}{j\omega_1} + \frac{kU_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-t/\tau_s^c} \quad (10)$$

根据第 1 节的分析可知, DFIG 暂态过程主要由转子磁链决定, 以下着重对转子磁链进行求解。

由于 RSC 闭锁, 转子侧电路被撬棒电路短接, 转子电压发生改变。将定子磁链、转子电压代入式(1)、式(2), 并进行拉氏变换可以得到式(11)。

$$\begin{cases} 0 = R_r^c i_r^c(p) + js\omega_1 \psi_r^c(p) + p\psi_r^c(p) - \psi_r(0) \\ i_r^c(p) = \frac{L_s}{L_D^c} \psi_r^c(p) - \frac{L_m}{L_D^c} \psi_s^c(p) \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_r^c 为撬棒电路投入后转子侧等效电阻, $R_r^c = R_r + R_c$; p 为拉式因子; $\psi_r(0)$ 为故障瞬间转子磁链初值; ψ_r^c 为故障瞬间转子磁链; i_r^c 为故障后转子故障电流。

此时联立式(10)、式(11)求出撬棒电路投入后的转子磁链, 并进行拉式反变换, 可得 dq 坐标系下撬棒电路投入后的转子磁链。

$$\psi_r^c = A_1 + A_2 e^{-j\omega_1 t} e^{-t/\tau_r^c} + A_3 e^{-js\omega_1 t} e^{-t/\tau_r^c} \quad (12)$$

式中: τ_r^c 为撬棒电路投入后转子衰减时间常数, $\tau_r^c = L_D^c / (R_r^c L_s)$; A_1 、 A_2 、 A_3 为转子磁链各分量幅值, 可以通过故障前定子电压、转子电压、电压跌落系数及双馈风机参数计算得到, 具体表达式为

$$\begin{cases} A_1 = \frac{R_r^c L_m}{j\omega_1 L_D^c (js\omega_1 + \tau_r^c)} (1-k) U_s \\ A_2 = \frac{R_r^c L_m}{j\omega_1 L_D^c (j\omega_1 - js\omega_1 - \tau_r^c + \tau_s^c)} k U_s \\ A_3 = \frac{U_r}{js\omega_1} - \frac{R_r^c L_m}{j\omega_1 L_D^c} \left[\frac{k U_s}{js\omega_1 - j\omega_1 + \tau_r^c - \tau_s^c} + \frac{(1-k) U_s}{js\omega_1 + \tau_r^c} \right] \end{cases} \quad (13)$$

为了实现有效滤除直流分量的目标, 电容选择应满足 $\tau_r^c = 0$ 这一条件, 以此来构建阻容式撬棒电路。将转子磁链滤除衰减直流分量后代入式(2), 即可得到 dq 坐标系下双馈风机的定子短路电流表达式。

撬棒电路投入后, RSC 闭锁而 GSC 依然并网运行, 由于 GSC 对故障电流的影响仅体现在故障电流峰值, 并不影响电流整体特性, 且影响效果并不明显, 因此本文忽略双馈风电机组 GSC 故障期间对双馈风电机组机端故障电流的影响, 近似认为定子侧故障电流即为双馈风电机组整体故障电流^[25]。将 dq 坐标系下短路电流表达式转换至 abc 静止坐标系下, 即可得三相电流表达式为

$$\begin{cases} i_{sa}^c = (A_4 + A_5 e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_r^c t}) e^{j\omega_1 t} \\ i_{sb}^c = (A_4 + A_5 e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_r^c t}) e^{-j2\pi/3} e^{j\omega_1 t} \\ i_{sc}^c = (A_4 + A_5 e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_r^c t}) e^{j2\pi/3} e^{j\omega_1 t} \end{cases} \quad (14)$$

式中, A_4 、 A_5 分别为 DFIG 基频分量与衰减直流分量电流系数, 具体表达式为

$$\begin{cases} A_4 = \left[\frac{L_r^c}{j\omega_1 L_D^c} - \frac{R_r^c L_m^2}{j\omega_1 L_D^c (j s \omega_1 + \tau_r^c)} \right] (1-k) U_s \\ A_5 = \left[\frac{L_r^c}{j\omega_1 L_D^c} - \frac{R_r^c L_m^2}{j\omega_1 L_D^c (j \omega_1 - j s \omega_1 - \tau_r^c + \tau_s^c)} \right] k U_s \end{cases} \quad (15)$$

阻容撬棒使转子磁链衰减, 直流分量被滤除, 暂态直流分量的消失一定程度抑制了故障后转子电流峰值, 通过式(14)可以看出定子电流中并未出现衰减转速含量, 改善了频偏现象。此时对于等效模型, 可将 DFIG 的高风速区机组与低风速区机组进行合并, 得到混合型风电场简化等效模型, 如图 6 所示。

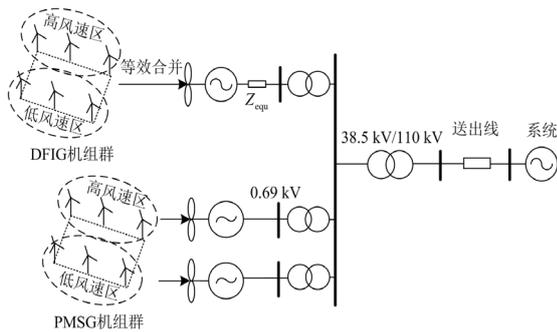


图 6 混合型风电场分群简化等效模型

Fig. 6 Simplified equivalent model of hybrid wind farm grouping

2.2 混合型风电场故障特性分析

混合型风电场中 PMSG 机组通过背靠背的全功率换流器并入电网, 其低电压穿越策略主要通过换流器指令值的动态调整以及直流卸荷电路两者协同作

用来实现。前者对直驱风机的故障电流特性影响较大, 而后者更多则是吸收直驱风机换流器直流母线上的过剩功率, 对故障电流特性影响较小^[26]。因此分析直驱风机故障特性时, 主要对 GSC 进行数学建模, 并分析其低电压穿越措施对短路电流的影响。首先建立 dq 坐标系下的 GSC 电压方程, 表示为

$$\begin{cases} U_{vd} = U_{sd} + R i_d - \omega L i_q + L \frac{di_d}{dt} \\ U_{vq} = U_{sq} + R i_q + \omega L i_d + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (16)$$

式中: R 、 L 分别为 GSC 进线电抗器的电阻值与电感值; U_{vd} 、 U_{vq} 分别为 GSC 电压 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为 GSC 电流 d 、 q 轴分量; U_{sd} 、 U_{sq} 分别为电网电压 d 、 q 轴分量; ω 为同步角速度。

通过图 7 的 GSC 网侧控制框图可得电流环控制方程为

$$\begin{cases} i_{dref} = k_{pv} (U_{dref} - U_{dc}) + k_{iv} \int (U_{dref} - U_{dc}) dt \\ i_{qref} = k_{pv} (Q_{ref} - Q) + k_{iv} \int (Q_{ref} - Q) dt \end{cases} \quad (17)$$

式中: k_{pv} 、 k_{iv} 为 GSC 电压环 PI 控制参数; U_{dc} 、 U_{dref} 分别为 GSC 直流母线电压及直流母线电压指令值; Q 、 Q_{ref} 分别为 GSC 发出无功功率及发出无功功率指令值; i_{dref} 、 i_{qref} 为 GSC 电流控制指令。

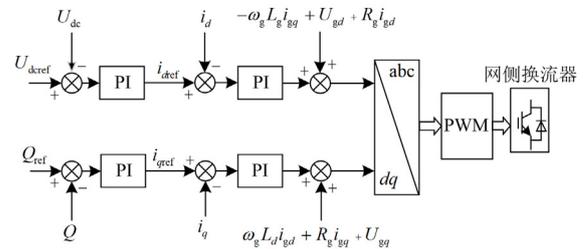


图 7 直驱风电机组 GSC 控制策略框图

Fig. 7 Block diagram of GSC control strategy for PMSG

联立式(16)、式(17)得到, dq 坐标系下直驱风电机组 GSC 电压外环及电流内环控制方程联立后的数学模型表示为

$$\begin{cases} U_{vd} = U_{sd} + R i_d - \omega L i_q + k_{pi} (i_{dref} - i_d) + k_{ii} \int (i_{dref} - i_d) dt \\ U_{vq} = U_{sq} + R i_q + \omega L i_d + k_{pi} (i_{qref} - i_q) + k_{ii} \int (i_{qref} - i_q) dt \end{cases} \quad (18)$$

式中, k_{pi} 、 k_{ii} 为 GSC 电流环 PI 控制参数。

当电网发生故障时, PMSG 将通过改变电流内环电流指令值 i_{dref} 、 i_{qref} 实现低电压穿越。因此将 GSC 电压方程与电流内环控制方程联立, 即可得到故障期间电流响应方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = k_{pi}(i'_{dref} - i_d) + k_{ii} \int (i'_{dref} - i_d) dt \\ L \frac{di_q}{dt} = k_{pi}(i'_{qref} - i_q) + k_{ii} \int (i'_{qref} - i_q) dt \end{cases} \quad (19)$$

式中, i'_{dref} 、 i'_{qref} 为低电压穿越期间 GSC 指令值, 由 GSC 的控制方式决定并给出具体数值。

式(19)由于含有积分项, 因此可对其求导转换为二阶微分方程。求解得可到 dq 坐标下电流的解析式为

$$\begin{cases} i_d = i'_{dref} + C_1 e^{-a_1 t} + C_2 e^{-b_1 t} \\ i_q = i'_{qref} + C_1 e^{-a_1 t} + C_2 e^{-b_1 t} \end{cases} \quad (20)$$

式中: C_1 、 C_2 可通过换流器故障初值计算得出; a_1 、 b_1 由换流器参数及控制器 PI 参数决定, 具体为

$$\begin{cases} a_1 = (-k_{pi} - \sqrt{k_{pi}^2 - 4Lk_{ii}}) / 2L \\ b_1 = (-k_{pi} + \sqrt{k_{pi}^2 - 4Lk_{ii}}) / 2L \end{cases} \quad (21)$$

将 dq 坐标系下直驱风机短路电流表达式转换至 abc 静止坐标系下, 可得三相电流表达式为

$$\begin{cases} i_{gsca} = (i_d + ji_q) e^{j\omega t} \\ i_{gscb} = (i_d + ji_q) e^{-j2\pi/3} e^{j\omega t} \\ i_{gscc} = (i_d + ji_q) e^{j2\pi/3} e^{j\omega t} \end{cases} \quad (22)$$

式中, i_{gsca} 、 i_{gscb} 、 i_{gscc} 分别为 PMSG 三相故障电流。

对于处于不同风速区间, PMSG 在同一电压跌落水平下其无功控制策略相同, 即都满足无功优先控制, 无功功率及无功响应过程也大致相同, 风速的不同仅对故障消失后 PMSG 功率恢复爬坡过程影响较大^[27]。故混合型风场分群简化模型也可将故障后的 PMSG 机组进一步合并得到等效故障模型, 如图 8 所示。

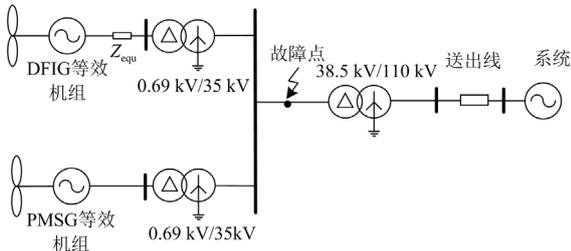


图 8 混合型风电场等效故障模型

Fig. 8 Equivalent fault model of hybrid wind farm

3 混合型风电场短路电流分析

根据前文分析可得, 当 f 点发生故障后, 各类型风力发电机组机端发生相同的电压跌落。假定机

端电压跌落系数 k 与 PCC 点电压跌落系数一致, 根据电压跌落程度可大体分为 DFIG 撬棒电路不动作与撬棒电路动作两种情况。

在撬棒电路动作后的这一阶段中, DFIG 无功特性及短路电流特性主要受风电机组的自身参数、机端电压跌落程度及撬棒参数影响, PMSG 短路电流特性受 GSC 控制策略的影响较大。在混合型风场等效故障模型的基础上, 结合第 2 节分析可得到混合型风电场的故障电流表达式, 以 A 相为例, 如式(23)所示。

$$i_{wa} = (A_4 + A_5 e^{-j\omega t} e^{-r_s^* t} + i_d + ji_q) e^{j\omega t} \quad (23)$$

式中, i_{wa} 为混合型风电场输出的短路电流。

而当故障较轻无法满足撬棒投入条件时, RSC 未发生闭锁, DFIG 可通过 RSC 的控制使其满足无功要求, 从而使混合型风电场整体满足要求。此时对于 PMSG 来说, 故障暂态过程与前文分析类似, 但其无功指令值相对会发生变化, 即电流相位受控并发出满足低电压穿越要求的无功电流。但对于 DFIG 来说, 暂态过程与投入撬棒有较大区别, 此时对于双馈风电机组故障电流表达式已有较多研究, 故不再赘述。

4 仿真分析

4.1 混合型风电场短路电流表达式验证

为验证本文短路电流计算式的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建混合型风电场并网仿真模型, 其接线图如图 9 所示。模型中混合型风电场的混合比例系数设置为 0.5, 即由 10 台容量为 2 MW 的双馈风力发电机组和 10 台容量为 2 MW 的永磁直驱风力发电机组组成。将故障点设置在风电场出口 f 点处, 由于故障时间较短, 忽略故障过程中风速变化的影响。DFIG 机组的参数如表 1 所示, PMSG 机组的参数如表 2 所示。

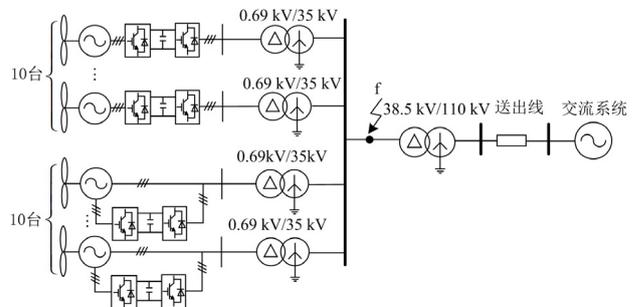


图 9 混合型风电场仿真系统接线图

Fig. 9 Wiring diagram of hybrid wind farm simulation system

表 1 双馈风电机组参数

Table 1 Parameters of DFIG

参数	数值	p.u.
定子电阻	0.054	
转子电阻	0.006 07	
定子漏感	0.1	
转子漏感	0.11	
定转子互感	2.9	
撬棒阻值	0.12	

表 2 直驱风电机组参数

Table 2 Parameters of PMSG

参数	数值
定子电阻/p.u.	0.0017
d 轴电抗/p.u.	0.55
q 轴电抗/p.u.	1.11
直流电容/p.u.	0.015
换流器内环 k_p	0.5
换流器内环 k_i	0.05
换流器限幅值/p.u.	1.2

在 $t = 6.0\text{ s}$ 时, 图 9 系统中 f 点发生三相电压跌落故障, 此时混合型风电场各类型机组机端电压跌落至 0.1 p.u. , 故障持续时间为 0.2 s , 撬棒投入判据为转子电流峰值大于 2 p.u. , 不考虑撬棒投入延时。由于发生对称故障, 三相故障电流对称, 此时取混合型风电场短路电流中的 A 相进行对比。

从图 10、图 11 可以看出, 混合型风电场短路电流理论波形与仿真波形变换趋势大致相同, 且在故障初期, 机端电压跌落至 0.1 p.u. 时短路电路峰值为 5.4 p.u. , 机端电压跌落至 0.3 p.u. 时短路电流峰值为 4.3 p.u. , 与理论值基本保持一致。同时由于故障发生时刻初始角度约为 0° , 双馈风电机组直流分量取最大值, 此时混合型风电场短路电流最大值应出现在 $\omega t = \pi$ 时, 即 $t = 6.01\text{ s}$ 。通过理论值与仿真值的对比可以看出二者电流峰值出现时刻大致相同。

由图 12 可以看出, 当混合系数发生改变时, 故障电流峰值会发生改变。这是由于永磁直驱风电机组在故障期间受到 GSC 限幅作用环节的影响, 故障初期峰值电流主要由双馈风电机组提供。混合系数 h 由 0.5 降低至 0.25 , 可等效为双馈风电机组占比由原来的 50% 降低为 25% , 混合型风电场正常运行电流变为 0.75 p.u. , 对故障电流幅值造成一定影响, 但仍可以看出短路电流理论波形与仿真波形变换趋势大致相同。

图 10—图 12 后续存在一定幅值及波形的误差的主要原因是计算双馈风电机组电流时假设定子磁

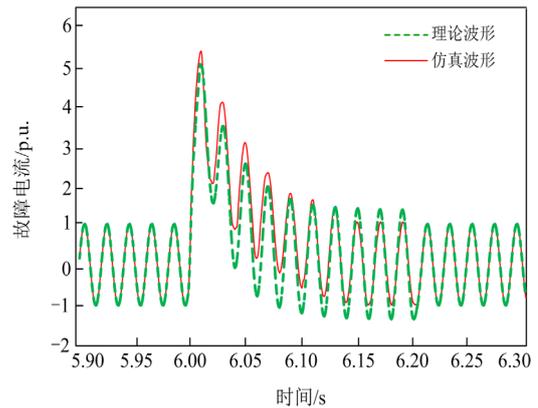


图 10 电压跌落至 0.1 p.u. 时电流波形图(h 为 0.5)

Fig. 10 Current waveform when voltage drops to 0.1 p.u. ($h = 0.5$)

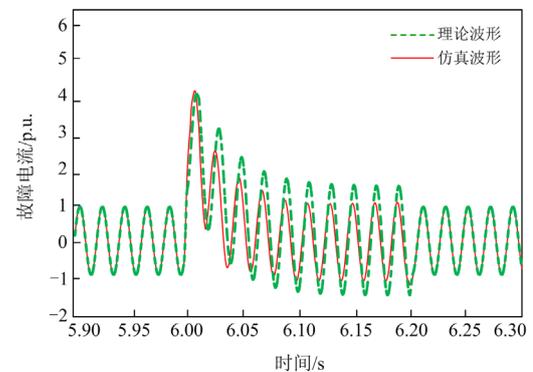


图 11 电压跌落至 0.3 p.u. 时电流波形图(h 为 0.5)

Fig. 11 Current waveform when voltage drops to 0.3 p.u. ($h = 0.5$)

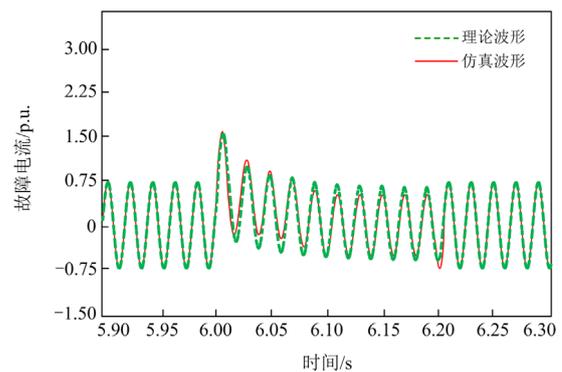


图 12 电压跌落至 0.3 p.u. 电流波形图(h 为 0.25)

Fig. 12 Current waveform when voltage drops to 0.3 p.u. ($h = 0.25$)

链恒定及风机转速不变, 同时忽略了直驱风电机组电流内环以及 GSC 的损耗。实际上在故障期间, 由于风机本身调节作用及控制系统的影响, 双馈风电机组的磁链以及风机转速会产生一定变化, 导致计

算产生误差。而直驱风力发电机组电流内环及 GSC 损耗也会使电流计算幅值存在一定误差, 且由于同时忽略了双馈风电机组 RSC 闭锁期间 GSC 对机端整体故障电流的作用, 导致混合型风电场整体理论电流的峰值及稳态值都与仿真值有一定的差别。但趋势基本相同, 验证了本文短路电流表达式的正确性。

4.2 协同策略有效性验证

本节主要仿真对比附加协同控制策略与传统低电压穿越策略混合型风电场各类型机组的无功特性及总体无功特性。 $t = 6.0\text{ s}$ 发生故障, 混合型风电场升压变低压侧发生三相对称电压跌落故障, 机端电压跌落至 0.5 p.u. , 故障持续时间为 0.2 s 。稳态时双馈风力发电机组与直驱风力发电机组都以单位功率因数运行, 不考虑风速影响, 故障期间双馈风电机组投入阻容式撬棒。

如图 13(a)所示, 此时 PCC 点电压跌落至 0.5 p.u. 。通过图 13(b)仿真分析可看出, 采用传统撬棒电路结构的双馈风力发电机组时, 由于撬棒电路短接转子

回路使双馈风电机组进入异步运行状态, 并吸收较多无功功率; 而采用阻容式撬棒会使无功吸收量从 0.4 p.u. 降低至 0.2 p.u. , 明显改善撬棒投入后双馈风电机组的无功特性, 其吸收无功功率明显降低。直驱风电机组采用本文所提低穿控制策略, 根据图 13(c)、图 13(d)可以看出, 直驱风电机组在低电压穿越期间提供大量无功电流支撑, 并根据双馈风电机组撬棒动作情况动态改变电流环控制指令值。根据图 13(f)可以看出, 在阻容式撬棒及直驱风电机组控制策略的协同作用下, 混合型风电场注入系统的总体无功电流由 0.45 p.u. 增加至 1.15 p.u. , 故障消失后, 无功电流及各风电机组控制指令值恢复至稳态值。

图 14(a)为 PCC 点电压跌落情况。通过进一步对图 14(b)进行仿真分析, 可以明显发现, 当发电机端电压出现更为严重的跌落, 即降至 0.2 p.u. 时, 阻容式撬棒改善无功的优势不明显, 这是由于双馈风电机组进入异步运行状态后, 无功特性受机端电压跌落程度影响, 但仍然可以看出阻容式撬棒的改善

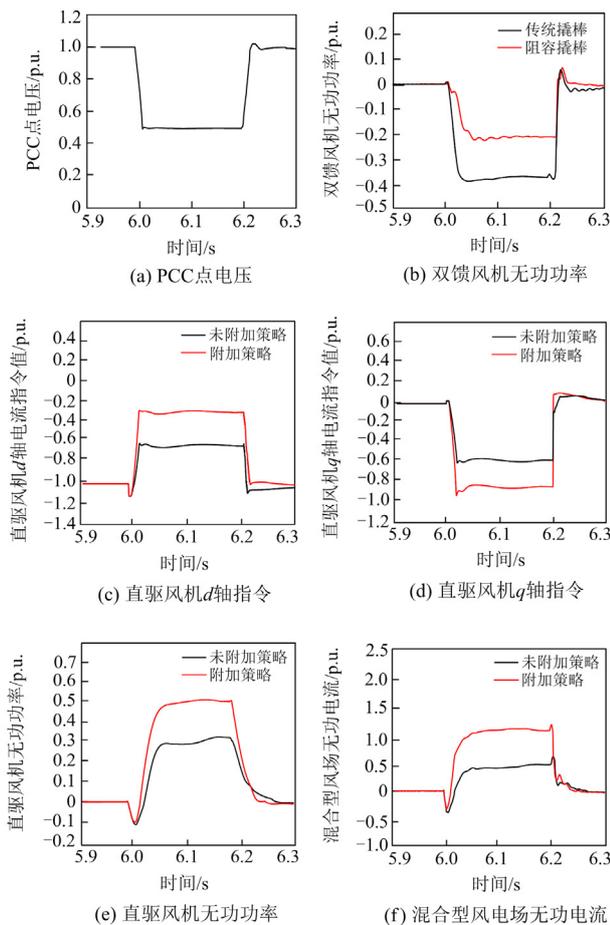


图 13 电压跌落 0.5 p.u. 策略对比图

Fig. 13 Strategies comparison diagram of voltage drops to 0.5 p.u.

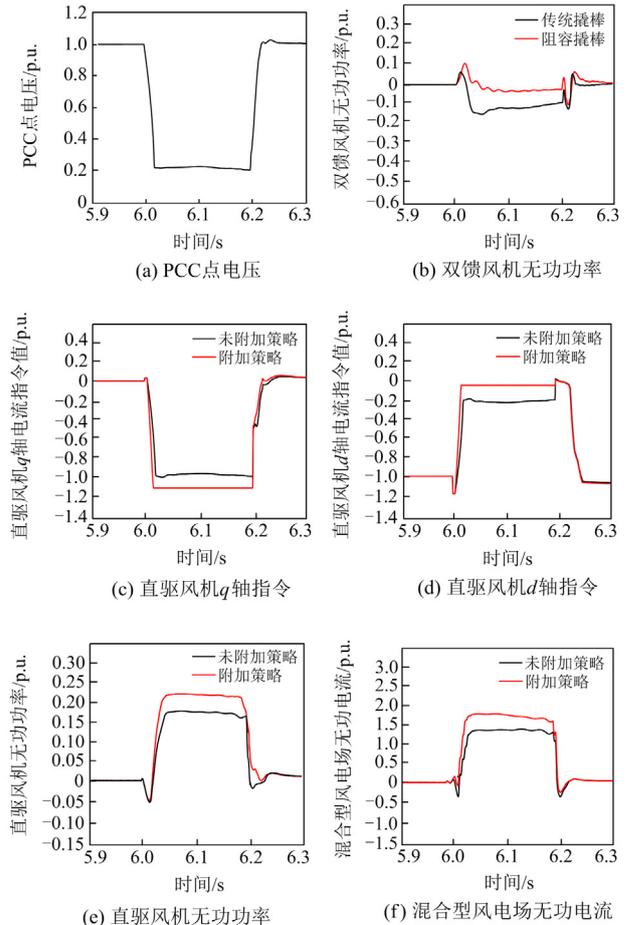


图 14 电压跌落至 0.2 p.u. 策略对比图

Fig. 14 Strategies comparison diagram of voltage drops to 0.2 p.u.

作用，即故障期间双馈风电机组无功吸收量由 0.15 p.u.变为 0.04 p.u.。根据图 14(c)、图 14(d)可以看出，在低电压穿越期间，直驱风电机组根据双馈风电机组撬棒动作情况动态提高了 dq 轴电流环控制指令值。根据图 14(e)可以看出，本文所提策略的 PMSG 机组无功功率由原本 0.15 p.u.提高至 0.22 p.u.，但增量没有 0.5 p.u.时明显，对比传统撬棒及传统控制策略，在阻容式撬棒及直驱风电机组控制策略的协同下，混合型风电场在电压穿越期间注入系统的总体无功电流由 1.2 p.u.增加至 1.7 p.u.，提高了故障期间混合型风电场的低电压穿越能力。

如图 15(a)所示，PCC 点电压跌落至 0.4 p.u.。通过对 $h = 0.25$ (即双馈风电机组总容量减少一半) 与 $h = 0.75$ (即永磁直驱风电机组总容量减少一半) 进行仿真分析对比，由图 15(b)可以看出，相比混合系数为 0.75，当混合系数为 0.25 时双馈风电机组吸收的无功功率减少，但由于直驱风电机组占比相对升高，风电场在故障期间输出的总体无功功率得到提升；由图 15(c)可以看出，当混合系数为 0.75 时，永磁直驱风电机组发出的功率由 0.2 p.u.升高至 0.26 p.u.，同时混合型风电场总体无功功率也得到提升。通过图 15 的仿真分析可以看出，在不同混合系数下，本文协同策略仍可提高故障期间混合型风电场的低电压穿越能力。

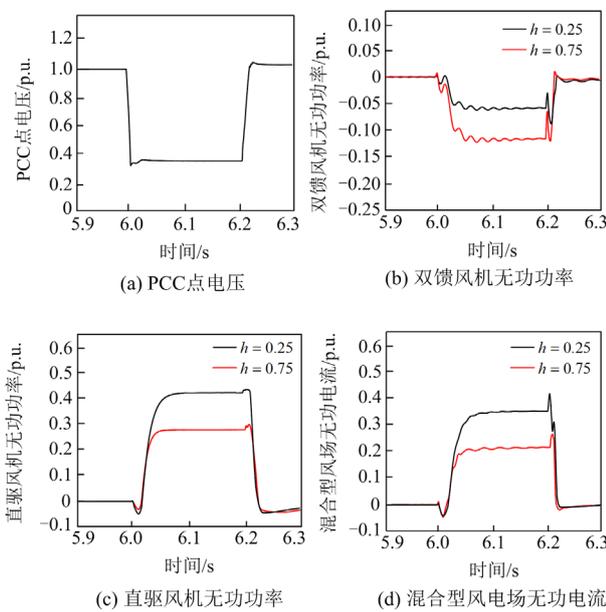


图 15 不同混合系数对比图

Fig. 15 Comparison diagram of different hybrid coefficients

5 结论

本文通过对混合型风电场中不同类型风电机

组的不同低电压穿越策略及协同策略进行分析，针对应用阻容式撬棒的混合型风电场，首先针对双馈风电机组及直驱风电机组分别从不同角度进行短路特性分析，然后针对不同机组低电压穿越期间无功特性提出协同策略，并通过仿真验证了短路电流的正确性以及协同策略的有效性，得到以下结论。

1) 混合型风电场的整体短路特性受不同机组低电压穿越策略影响较大。当发生严重故障时，双馈风电机组短路特性受撬棒电路结构影响较大，直驱风电机组受网侧换流器控制策略影响较大，同时不同机组的无功调节能力受低电压穿越策略影响较大。相较于传统纯电阻式撬棒电路结构，阻容式撬棒电路结构可以改善双馈风电机组的无功特性，在混合型风电场中，利用其特性可以提升风电场整体低电压穿越能力。

2) 通过对混合型风电场短路电流理论与仿真分析，可以发现当应用阻容式撬棒的混合型风电场发生三相对称故障时，其电流以基频稳态分量为主。当双馈风电机组采用传统撬棒时，其短路电流会产生频偏含量，而直驱风电机组几乎不产生频偏含量，因此阻容式撬棒可以通过滤除 DFIG 转子侧暂态直流含量降低定子侧频偏含量，进而改善混合风电场整体的频偏现象。

3) 相比传统控制策略，本文所提策略可以充分利用不同类型机组的无功调节能力，同时优化双馈风电机组及直驱风电机组低电压穿越期间的无功支撑能力，有效提高了混合型风电场的整体低电压穿越能力，并通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建混合型风电场仿真模型，验证了控制策略的有效性。

参考文献

[1] WANG Li, DINH-NHON T. Stability enhancement of a power system with a PMSG-based and a DFIG-based offshore wind farm using a SVC with an adaptive-network based fuzzy inference system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2799-2807.

[2] 崔森, 颜湘武, 李锐博. 提高双馈风电机组动态无功协调控制能力的实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 117-129.

CUI Sen, YAN Xiangwu, LI Ruibo. Experimental research on improving the dynamic reactive power coordinated control capability of doubly-fed induction wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 117-129.

[3] 杨玉坤, 许建中. 基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 106-116.

- YANG Yukun, XU Jianzhong. Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines based on supercapacitor energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(18): 106-116.
- [4] 王晓阳, 郑迪, 杨国生, 等. 混合型风电场中双馈风电机组三相短路电流分析[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(9): 19-29.
- WANG Xiaoyang, ZHENG Di, YANG Guosheng, et al. Analysis of three-phase short-circuit currents contributed by DFIG in hybrid wind farm[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(9): 19-29.
- [5] 李辉, 赵斌, 史旭阳, 等. 含不同风电机组的风电场暂态运行特性仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(13): 1-7.
- LI Hui, ZHAO Bin, SHI Xuyang, et al. Simulation study on the transient operational performances of a wind farm including different wind turbine generator systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(13): 1-7.
- [6] 范小红, 孙士云, 孙德娟, 等. 双馈风机三相短路电流特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(18): 38-48.
- FAN Xiaohong, SUN Shiyun, SUN Dejuan, et al. Analysis of three-phase short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 38-48.
- [7] 范小红, 安德超, 孙士云, 等. 计及撬棒保护动作时间的双馈风机三相短路电流特性分析[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(16): 3444-3452.
- FAN Xiaohong, AN Dechao, SUN Shiyun, et al. Three-Phase short circuit current characteristic analysis of doubly fed induction generator considering crowbar protection action time[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(16): 3444-3452.
- [8] 姜惠兰, 李希钰, 贾燕琪, 等. 电网电压不对称跌落下DFIG 低电压穿越控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(12): 27-33, 42.
- JIANG Huilan, LI Xiyu, JIA Yanqi, et al. Low voltage ride-through control strategy for DFIG under asymmetrical grid voltage drop[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(12): 27-33, 42.
- [9] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(22): 29-36.
- XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(22): 29-36.
- [10] 高淑萍, 蔚坤, 宋国兵. 基于双馈风电场的三相短路电流计算及保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(7): 32-39.
- GAO Shuping, YU Kun, SONG Guobing. Calculation and protection method for a three-phase short circuit fault current based on a doubly-fed wind field[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(7): 32-39.
- [11] 杨晨星, 杨旭, 童朝南. 双馈异步风力发电机低电压穿越的软撬棒控制[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(8): 2487-2495, 2558.
- YANG Chenxing, YANG Xu, TONG Chaonan. An LVRT control strategy based on soft crowbar control for doubly fed induction wind power generations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(8): 2487-2495, 2558.
- [12] 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. Low voltage ride through control strategy of doubly fed induction generator based on crowbar series capacitor[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(7): 2089-2095.
- [13] 杨兴雄, 束洪春, 单节杉, 等. 计及阻容式撬棒动作时间的双馈风机短路电流分析[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(22): 4716-4725.
- YANG Xingxiong, SHU Hongchun, SHAN Jieshan, et al. Short circuit current analysis of DFIG considering resistance-capacitance type crowbar protection action time[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(22): 4716-4725.
- [14] 宋国兵, 常仲学, 王晨清, 等. 直驱风机三相短路电流特性分析[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(10): 1-7.
- SONG Guobing, CHANG Zhongxue, WANG Chenqing, et al. Three-phase fault current characteristics of permanent magnet synchronous generator[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(10): 1-7.
- [15] 任永峰, 胡宏彬, 薛宇, 等. 基于卸荷电路和无功优先控制的永磁同步风力发电机组低电压穿越研究[J]. *高电压技术*, 2016, 42(1): 11-18.
- REN Yongfeng, HU Hongbin, XUE Yu, et al. Low voltage ride-through capability improvement of PMSG based on chopper circuit and reactive priority control[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(1): 11-18.
- [16] 刘忠义, 刘崇茹, 李庚银. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的功率协调控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(3): 23-29.
- LIU Zhongyi, LIU Chongru, LI Gengyin. Coordinated power control method for improving low voltage ride through capability of wind turbines with permanent magnet synchronous generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(3): 23-29.

- [17] 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.
- [18] 姚骏, 余梦婷, 陈知前, 等. 电网对称故障下含 DFIG 和 PMSG 的混合型风电场群的协同控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 26-36.
YAO Jun, YU Mengting, CHEN Zhiqian, et al. Coordinated control strategy for hybrid wind farms with DFIG and PMSG under symmetrical grid faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 26-36.
- [19] 黄涛, 陆于平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2759-2765.
HUANG Tao, LU Yuping. Analysis on transient EMF variation characteristic of doubly fed induction generator after crowbar protection activated[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2759-2765.
- [20] 黄弘扬, 马俊超, 袁嫣红, 等. 考虑 Crowbar 动作特性的 DFIG 风电场短路电流特性分析[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1325-1332.
HUANG Hongyang, MA Junchao, YUAN Yanhong, et al. Analysis for short circuit current of wind farm composed of double fed induction generators considering operation characteristic of crowbar[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(9): 1325-1332.
- [21] 绳晓玲, 韩旭超, 万书亭. 风速分布差异对永磁风力发电机组故障特性的影响分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 123-132.
SHENG Xiaoling, HAN Xuchao, WAN Shuting. Fault characteristics analysis of permanent magnetic wind turbines considering wind speed distribution differences[J]. Acta energiae Solaris Sinica, 2023, 44(2): 123-132.
- [22] WANG Fei, JORGE L, HENDRIX MAM. Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1511-1522.
- [23] 中国电力企业联合会. 风电场接入电力系统技术规定第 1 部分: 陆上风电 GB/T 19963.1—2021[S].
- [24] 靳现林, 蔡晓宇, 刘其辉, 等. 一种考虑 RSC 和 GSC 的双馈风机短路电流实用计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 23-30.
JIN Xianlin, CAI Xiaoyu, LIU Qihui, et al. A practical calculation method for short-circuit current of DFIG considering RSC and GSC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 23-30.
- [25] 栗然, 高起山, 刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 153-158.
LI Ran, GAO Qishan, LIU Wei. Characteristics of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generator under symmetrical three-phase short-circuit fault[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 153-158.
- [26] LI Botong, ZHENG Dingchuan, LI Bin, et al. Analysis of low voltage ride-through capability and optimal control strategy of doubly-fed wind farms under symmetrical fault[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 585-599.
- [27] 李东晟, 沈沉, 吴林林, 等. 考虑初始风速与机端故障稳态电压跌落程度的直驱风机故障响应特性分类及其判别方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-15[2023-12-30]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222672.
LI Dongsheng, SHEN Chen, WU Linlin, et al. Study on fault response characteristics classification and discriminant method of PMSG considering initial wind speed and drop degree of terminal fault steady-state voltage[J]. Proceedings of the CSEE: 1-15[2023-12-30]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222672.
- [28] TAO Renfeng, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Research on the protection coordination of permanent magnet synchronous generatorbased wind farms with low voltage ride through capability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 311-319.

收稿日期: 2023-08-31; 修回日期: 2024-01-11

作者简介:

冯海洋(1997—), 男, 硕士, 研究方向为风电送出系统继电保护; E-mail: 923188136@qq.com

宋建(1978—), 男, 通信作者, 硕士, 实验师, 研究方向为电力系统信号处理及新能源技术应用。E-mail: kustsj2018@126.com

(编辑 许威)