

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306979

基于混合势函数的永磁同步风力发电机暂态稳定性分析*

李鑫¹ 孙洋¹ 杨桢¹ 王顺江² 李昊¹ 韩磊¹ 刘齐³

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105; 2. 国网辽宁省电力有限公司 沈阳 110004;

3. 国网辽宁省电力有限公司盘锦供电公司 盘锦 124000)

摘要: 永磁同步发电机(permanent magnetic synchronous generator, PMSG)作为海上风力发电的主要设备,是风电技术的重要发展方向。然而,PMSG在运行过程中,受到大扰动干扰会导致其暂态稳定性下降。因此,针对PMSG风机大扰动下的暂态稳定性阈值难以判定的问题,本文基于混合势函数理论,建立了PMSG风机系统简化后的混合势函数模型,并推导出PMSG风机在大扰动后的暂态稳定判据。通过仿真后的网侧电流波形和网侧功率波形验证了暂态稳定判据的准确性,并调整各参数数值以分析PMSG风机暂态稳定性与风机参数、故障深度、故障时间和风速的关联性。

关键词: 永磁同步风力发电机;混合势函数;稳定判据;暂态稳定性

中图分类号: TN702;TM614 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 47040

Transient stability analysis of permanent magnetic synchronous wind generator based on mixed potential function

Li Xin¹ Sun Yang¹ Yang Zhen¹ Wang Shunjiang² Li Hao¹ Han Lei¹ Liu Qi³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. State Grid Liaoning Province Electric Power Company, Shenyang 110004, China;

3. State Grid Liaoning Province Electric Power Co., Ltd., Panjin Power Supply Company, Panjin 124000, China)

Abstract: Permanent magnetic synchronous generator (PMSG), as the main equipment of offshore wind power generation, is an important development direction of wind power technology. However, the transient stability of PMSG decreases when it is disturbed by large disturbances. Therefore, in view of the difficulty in determining the threshold of transient stability of PMSG fans under large disturbance, this paper established a simplified mixed potential function model of PMSG fan system based on the theory of mixed potential function, and derived the criterion of transient stability of PMSG fans after large disturbance. The accuracy of the transient stability criterion was verified by the simulated grid-side current waveform and grid-side power waveform, and the correlation between the transient stability of PMSG fans and fan parameters, fault depth, fault time and wind speed were analyzed by adjusting the parameter values.

Keywords: permanent magnetic synchronous generator; mixed potential function; stability criterion; transient stability

0 引言

风能作为清洁能源之一,海上风电项目的实施相对

于陆地风电具有更高的土地利用率和风能利用率,因此,在能源利用方面拥有更大的优势。而随着大规模的风电接入,其受到的扰动也将增多,结合海上复杂的环境,设备离岸距离远,故障发生速度快且多为永久性故障,风电

收稿日期: 2023-10-19 Received Date: 2023-10-19

* 基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目(重点攻关项目)(JYTZD2023075, LJKZZ20220046)、辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300138)、辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-29)资助

易受到大扰动产生的故障频率将进一步增加,其维护成本也会提升^[1-3]。而风电系统中变流器开关管故障、海上雷电暂态过电压、三相短路故障以及风速变化等均会产生大扰动,为PMSG风机的稳定运行带来挑战^[4-6]。而随着风机的运行时间逐步增长,其故障率也会逐步增高,为了尽可能避免风机故障导致的巨大经济损失,其故障诊断方法的研究成为迫切所需^[7]。因此,为避免风电设备的损坏,海上风电系统大扰动稳定性的研究十分重要。

在国内外研究及应用领域中,永磁同步风力发电机作为当今海上风电大扰动暂态稳定性的主要研究对象。文献[8]研究了适用于暂态稳定分析的PMSG风机的建模方法,通过比较不同模型的稳定性,为PMSG的建模方式提供参考。文献[9]为了研究PMSG风机的暂态特性,提出了三阶微分方程描述的等效数学模型,并验证不同程度的故障下模型的稳定性。文献[10]采用蝠鲼觅食优化器优化PMSG风机模型,使其能够保持直流侧电容电压处于正常值。文献[11]阐述了风速、极端天气及雷击的大扰动下对海上风电系统的可靠性评估影响。但由于风机暂态模型构造复杂,建模时若考虑各部分耦合状态则会使方程阶数过高,暂态过程中会导致计算量过于庞大。而由于风机在交流控制尺度时间很短,各类电流可认为理想跟踪状态,而直流控制尺度长于交流控制尺度,在暂态稳定性中常作为重点考虑。因此忽略短时间尺度,保持PMSG基本模型并等效成电力电子元件,则更有利于分析暂态稳定性^[12]。

在暂态稳定性分析方面,文献[13]提出一种基于能量函数法的PMSG风机暂态稳定性分析方法,并分析了惯性控制参数与稳定性的关系。文献[14]针对系统惯量小导致的频率暂态稳定性差的问题提出虚拟惯量一阶自抗扰控制方法,进一步减小了暂态频率的偏差。文献[15]基于拓展等面积理论,将系统等效方程中的参数与风电接入比例相关联,计算出较好的暂态功角稳定性的风电接入比例。文献[16]提出风电网侧可调节节点对危险节点无功补偿控制,在风电功率产生波动时,能有效提升局部电网电压稳定性。然而,当下对风机暂态稳定性的研究多局限于风机局部暂态稳定性,风机整体的暂态稳定性却鲜有研究。

以上研究方法为大扰动下的建模提供了依据,并分析了不同控制算法下的风机局部暂态稳定性,但并未探究大扰动下风机各参数与暂态稳定性的关联,以及风机整体的暂态稳定判据。因此本文以海上风电为研究对象,简化PMSG风机动态模型;再构造PMSG风机的混合势函数以计算出大扰动下的暂态稳定判据;最后通过仿真,结合大扰动后的网侧电流、网侧功率验证了稳定判据的准确性,并确定了各参数与系统稳定性关系。

1 海上风力发电机结构与控制模型

1.1 永磁同步风机简化模型

PMSG风机常用于海上风电,本文以PMSG风机为对象展开研究,其模型结构如图1所示,其具体构成如下:

1) 风力机采用变桨距控制,使风力机运行于最佳叶尖速比以捕获最大风能^[17]。

2) 机侧变流器采用零 d 轴控制下的PMSG矢量控制策略,调节发电机电磁转矩以实现最大功率跟踪技术(MPPT)^[18],并通过检测的风速和风机参数,计算出最大功率输出转速,由此可以最大限度的利用风能。

3) 网侧变流器采用电网电压定向的矢量控制、单位功率因数控制和锁相环(PLL)控制。

4) 变压器与并网输电线路阻抗同后端电网共同等效为恒功率负载。

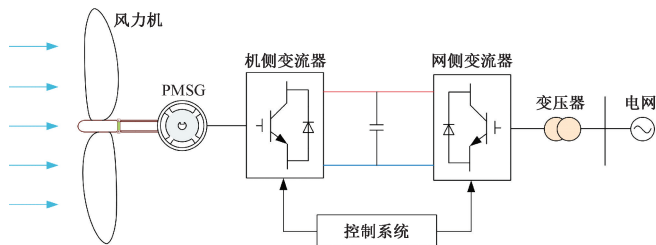


图1 永磁同步风力发电机模型

Fig. 1 Permanent magnet synchronous generator model

PMSG风机通过双侧PWM全功率变流器与电网端连接,风力机捕获最大风能,机侧变流器控制发电机转速,实现MPPT,网侧变流器稳定直流侧电容电压,并保证网电流质量。

1.2 PMSG风机系统控制

风力机的风能功率捕获公式为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, A 为桨叶承风面积, C_p 为风能利用系数, v 为当前风速。

风力机的最佳功率为:

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho A C_{pmax} (Rw/\lambda_{opt})^3 \quad (2)$$

其中, C_{pmax} 为最大风能利用系数, R 为桨叶半径, w 为机械角速度, λ_{opt} 为最佳叶尖速比。因此,为了实现MPPT,需在不同风速下,保持桨距角一定,并调整发电机转速,保持最佳叶尖速比。

在三相静止坐标系中,电压方程和功率方程的计算比较复杂,为进一步凸显网侧变流器控制参数对稳定性

影响并简化功率方程运算,可以采用 Park 变换进行简化。

Park 变换定义了 ABC 三相静止坐标系到 dq 两相旋转坐标系的变换矩阵:

$$P_{ABC/dq} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{pmatrix} \quad (3)$$

本文采用的双侧 PWM 全功率变流器系统,与 PMSG 连接的变流器起整流作用,为机侧变流器;与电网端连接的变流器起到逆变作用,为网侧变流器。在电网端故障导致电压变化时,首先受到影响的是网侧变流器,而发电机受到的是机侧变流器的影响,而两侧的变流器是通过直流侧电容耦合的,因而网侧变流器控制在稳定性中起主要作用^[19]。机侧和网侧变流器控制图如图 2 所示。

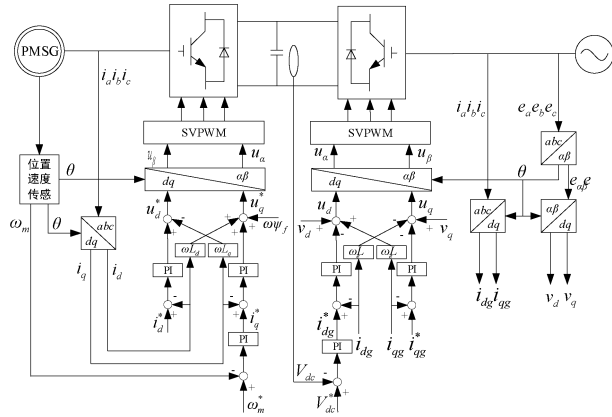


图 2 变流器整体控制图

Fig. 2 Converter overall control chart

基于网侧直流电压外环、无功电流内环的双闭环控制策略,以保证直流侧电容电压由网侧控制;在 $i_{qg}^* = 0$ 的情况下,保证电网侧功率因数为 1,实现单位功率因数控制。

网侧电压定向到 d 轴上,因此, q 轴电压 $V_q = 0$ 。由瞬时功率理论可知,有功功率和无功功率分别是:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(V_d i_{dg} + V_q i_{qg}) = \frac{3}{2}V_d i_{dg} \\ Q = -\frac{3}{2}(V_q i_{dg} - V_d i_{qg}) = -\frac{3}{2}V_d i_{qg} \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_d 、 V_q 分别为电网电压 dq 轴分量, i_{dg} 、 i_{qg} 分别为电网电流 dq 轴分量。

d 轴单独控制有功功率, q 轴单独控制无功功率。由此可知,系统实现有功与无功的解耦。 $P < 0$ 时,变流器起整流作用,电网向直流侧反馈能量; $P > 0$ 时,变流器起逆变作用,直流侧向电网输出有功功率。而无功功率 Q 通常为 0;

网侧采用 PI 调节器控制,其控制方程为:

$$\begin{cases} U_d = -K_{p1}K_{p2}(V_{dc}^* - V_{dc}) - K_{p2}K_{i1} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \\ - K_{i2} \int (i_d^* - i_d) dt + V_d + i_q \omega_e L \\ U_q = -K_{p3}(i_q^* - i_q) - K_{i3} \int (i_q^* - i_q) dt + V_q - i_d \omega_e L \end{cases} \quad (5)$$

直流侧电压参考值与实际值做差后,输入 PI 控制器后输出网侧 d 轴电流参考值 i_d^* ; 电流环中,设定 q 轴电流参考值 $i_{qg}^* = 0$,将 dq 轴参考值与实际值比较后输入 PI 控制器,并在 d 轴结合 q 轴耦合项 $i_q \omega_e L$,在 q 轴结合 d 轴耦合项 $i_d \omega_e L$,分别得到 dq 轴电压值。

风电锁相环能够准确跟踪机侧电压相位是 PMSG 正常工作的基础,其控制结构如图 3 所示。

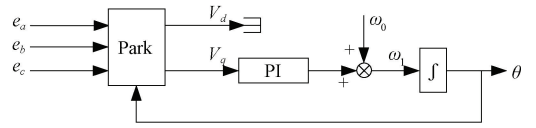


图 3 PLL 控制框图

Fig. 3 PLL Control block diagram

图 3 中 e_a 、 e_b 、 e_c 是网侧电压 a、b、c 分量,经过 Park 变换后,得到 dq 轴电压分量, q 轴电压经 PI 控制器并与基准角速度 ω_0 结合,积分后得到相角 θ 作为网侧控制环节基础。

2 混合势函数理论

2.1 混合势函数稳定性理论

混合势函数理论是 Brayton 和 Moser 提出的一种李雅普诺夫函数的特殊形式,能够有效的估计风电系统中电感和电容等非线性电路的暂态稳定性,为交直流电路的电力系统稳定性提供稳定判据。具体步骤包括:首先简化 PMSG 暂态等效模型;然后根据 PMSG 电路中的电容、电感及非储能元件组成的非线性系统构造混合势函数;最后计算得到系统稳定性判据。

根据非线性电感、电容以及储能元件构建混合势函数 P 的电路结构和控制参数。

$$P(i, v) = -A(i) + B(v) + (i, \gamma v - \alpha) \quad (6)$$

式中: $A(i)$ 是电路中的电流势函数; $B(v)$ 是电路中的电压势函数; $(i, \gamma v - \alpha)$ 是电容及其他非储能元件的电压电流乘积。

本文由直流侧电容、进线电感及恒功率负载组成的非线性电路适用于混合势函数的第三稳定性定理^[20],对电流势函数求二阶偏导 $A_{ii}(i) = \partial^2 A(i) / \partial i^2$,对电压势函数求二阶偏导 $B_{vv}(v) = \partial^2 B(v) / \partial v^2$ 。定义最小特征值:

$$\begin{cases} \mu_1 = \lambda_{\min} \left[\frac{1}{\sqrt{L}} A_{ii}(i) \frac{1}{\sqrt{L}} \right] \\ \mu_2 = \lambda_{\min} \left[\frac{1}{\sqrt{C}} B_{vv}(v) \frac{1}{\sqrt{C}} \right] \end{cases} \quad (7)$$

若满足:

$$\mu_1 + \mu_2 > 0 \quad (8)$$

同时当 $|i| + |v| \rightarrow \infty$ 时满足:

$$P^*(i, v) = \frac{\mu_1 - \mu_2}{2} p(i, v) + \frac{1}{2} \left(P_i, \frac{P_i}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(P_v, \frac{P_v}{C} \right) \rightarrow \infty \quad (9)$$

其中, 势函数 $P_i = \partial P(i, v) / \partial i$, $P_v = \partial P(i, v) / \partial v$ 。非线性系统中受到大信号干扰时, 电压电流会产生突变, 但系统所有解最终都趋于稳定平衡点, 即系统大扰动下处于暂态稳定性。

对于已建立的混合势函数是否符合标准形式, 其验证方法如下:

$$\begin{aligned} L_\alpha \frac{di_\alpha}{dt} &= \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_\alpha} \\ C_\beta \frac{dv_\beta}{dt} &= -\frac{\partial P(i, v)}{\partial v_\beta} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: i_α 和 v_β 分别为混合势函数中的电流、电压变量; L_α 和 C_β 分别为电路 KVL 和 KCL 计算后, i_α 和 v_β 对应的电感、电容。若等式成立, 则可以认为符合混合势函数的建立标准。

2.2 永磁同步风机的混合势函数

在海上风力发电机运转时, 其发电机部分可以等效成电压源, 取有效值作为等效值; 变流器部分可以等效成电压源或电流源。在本文中, 机侧变流器始终处于 MPPT, 由于暂态过程中, 发电机的转速几乎不发生改变, 因此机侧变流器可以等效成受控电流源, 取瞬时值为等效值; 而在网侧变流器运行时, 其控制环节中, 电流控制环节的电流变换时间为毫秒级, 远远小于大扰动作用下对网侧变流器产生影响的时间, 因此网侧变流器可以等效成电压源, 取有效值为等效值。在风机并网过程中, 并网输电部分及电网端特性分为: 源-网-控特性、源-网特性和源特性, 因此可将并网输电部分及电网端等效成恒功率负载, 所以可以得到图 4 所示的等效模型。

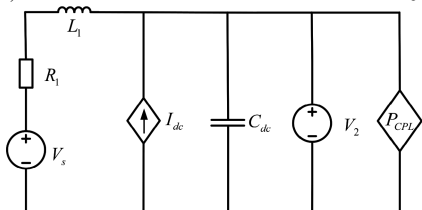


图4 等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model

图4中 V_s 为永磁同步电机等效电压源, R_1 、 L_1 为机侧接入的泄放电阻和进线电感, I_{dc} 为机侧变流器等效电流源, C_{dc} 为直流侧滤波电容, V_2 为网侧变流器等效电压

源, P_{CPL} 为并网输电部分及电网端等效成的恒功率负载。

将图1等效电路模型进一步简化, 等效电压源和等效电流源并联后省略等效电流源, 得到如图5所示的简化电路模型。

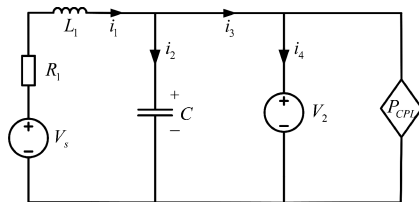


图5 简化电路模型

Fig. 5 Simplified circuit model

图5中 V_s 路电流为 i_1 , C 路电流为 i_2 , 旁路电流为 i_3 , V_2 路电流为 i_4 。

根据简化电路模型可以看出, 图中存在由电压源和恒功率负载组成的非储能元件以及电容, 计算相应的电流势函数:

$$\begin{aligned} A(i) &= \int_{\Gamma} V_s di_1 - \int_{\Gamma} i R_1 di_1 - \int_{\Gamma} V_2 di_4 = \\ &= \int_0^{i_1} V_s di - \frac{1}{2} i_1^2 R_1 - \int_0^{i_4} V_2 di \end{aligned} \quad (11)$$

电压势函数如下:

$$B(v) = - \int_{\Gamma} V_c di_{CPL} = - P_{CPL} + \int_0^v \frac{P_{CPL}}{V} dV \quad (12)$$

电容支路的电压电流乘积:

$$(i, \gamma v - \alpha) = - V_c i_4 = P_{CPL} - V_c i_3 \quad (13)$$

将式(11)、(12)和(13)求和后, 得到简化电路模型的混合势函数为:

$$\begin{aligned} P(i, v) &= \int_0^{i_1} V_s di - \frac{1}{2} i_1^2 R_1 - \int_0^{i_4} V_2 di + \\ &+ \int_0^v \frac{P_{CPL}}{V} dV - V_c i_1 + V_c i_4 \end{aligned} \quad (14)$$

根据 KVL 和 KCL 可知:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} = V_s - V_c - i_1 R_1 \\ C \frac{dV_c}{dt} = i_1 - i_4 - \frac{P_{CPL}}{V_c} \end{cases} \quad (15)$$

分别对式(14)求电感电流和直流侧电容电压偏导, 结合式(15)对得到的混合势函数进行验证:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} = \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_1} \\ C \frac{dV_c}{dt} = - \frac{\partial P(i, v)}{\partial V_c} \end{cases} \quad (16)$$

由此可知, 求出的混合势函数满足验证条件, PMSG 简化电路可应用于大扰动暂态稳定性分析。

电流势函数的二阶偏导 $A_{ii}(i_1) = R_1$, 电压势函数的二阶偏导 $B_{vv}(V_c) = -P_{CPL}/V_c^2$, 计算二者最小特征值得到:

$$\begin{cases} \mu_1 = \lambda_{\min} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{L}} A_{ii}(i_1) \frac{1}{\sqrt{L}} \right) \right] = R_1/L_1 \\ \mu_2 = \lambda_{\min} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{C}} B_{vv}(V_c) \frac{1}{\sqrt{C}} \right) \right] = -\frac{P_{CPL}}{CV_c^2} \end{cases} \quad (17)$$

第三稳定性定理要求 $\mu_1 + \mu_2 > 0$, 由此要求:

$$\mu_1 + \mu_2 = \frac{CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL}}{L_1 CV_c^2} > 0 \quad (18)$$

式中: L_1 、 C 、 V_c^2 取值均为正数, 因此得到大扰动下的稳定判据:

$$CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} > 0 \quad (19)$$

式中: C 是化简后的直流电容值, V_c 是化简后的直流电容电压, R_1 是泄放电阻, L_1 是进线电感, P_{CPL} 是恒功率负载。

3 仿真分析与验证

目前, 我国以离岸距离 < 50 km 的风机为海上风电项目的主体, 本文以 2 MW 的 PMSG 风机作为仿真模型并以 10 kV 输电, 此时风机向电网传输最大功率为 2 000 kW。为了验证混合势函数在 PMSG 中的暂态稳定性, 本文以图 5 简化电路模型为算例, 在 MATLAB/Simulink 中搭建 PMSG 仿真模型, 并通过调节三相短路故障模块模拟大扰动, 其对应参数如表 1 所示。

表 1 PMSG 系统主要参数

Table 1 PMSG system main parameters	
相关参数	数值
定子电阻/ Ω	0.5
定子电感/H	0.01
泄放电阻/ Ω	0.03
进线电感/H	0.01
直流侧电容/F	0.05
恒功率负载/kW	2 000
风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	15
电网电压/V	690
滤波电阻/ Ω	0.030 7
滤波电感/mH	0.109 8

在表 1 的数据下稳定运行的直流侧电容电压波形维持在 1 200 V, 电容电压和网侧电流如图 6 所示。

3.1 网侧参数对 PMSG 风机暂态稳定性的影响

当 PMSG 在表 1 的参数下运行时, 在 0.8 ~ 1 s 过程中产生大扰动, 如图 7 所示。

对照网侧电流图可知, 大扰动前后电流无变化, 系统能够稳定运行。而在大扰动下, 电容电压最低点为

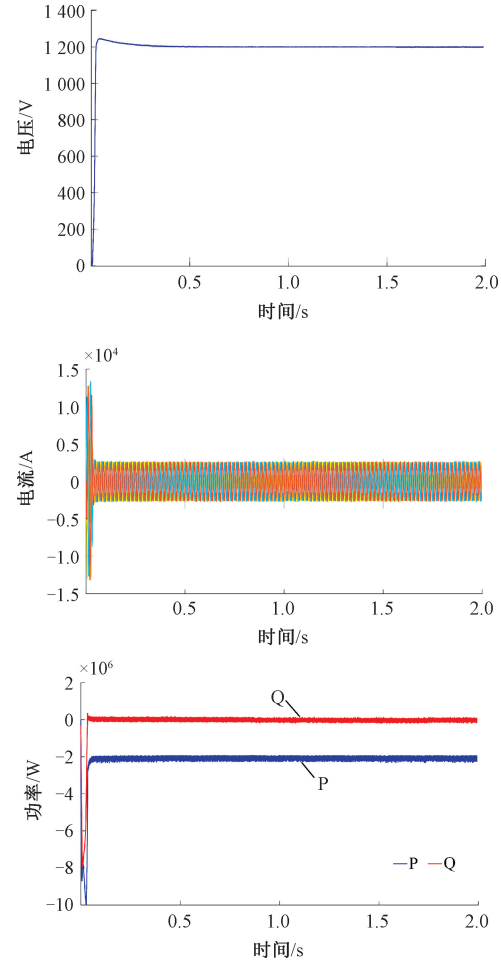


图 6 电容电压、网侧电流与功率图
Fig. 6 Capacitance voltage, grid-side current and power diagram

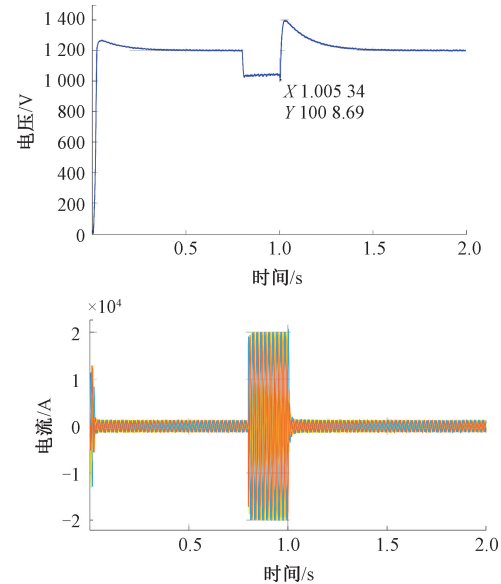


图 7 $K_{p1} = 12, K_{i1} = 100$ 时直流侧电容电压和网侧电流
Fig. 7 $K_{p1} = 12, K_{i1} = 100$ DC side capacitor voltage and grid side current

1 008.69 V, 据稳定判据可知 $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} > 0$, 因此稳定判据能够判断系统稳定性。

大扰动产生后, 网侧变流器输出的有功功率降低, 机侧发电机输入功率在暂态过程中因其惯性而未产生变化, 因此不平衡的功率导致大扰动结束后直流侧电容电压上升。

1) 网侧电压环对 PMSG 风机暂态稳定性的影响

系统如图 7 所示运行时, 电压环比例参数 $K_{p1} = 12$, 积分参数 $K_{i1} = 100$ 。保持积分系数不变, 增大比例系数 K_{p1} 至 22, 其直流侧电容电压波形如图 8 所示, 电压跌落至 0 V, 系统直接失稳, 经大扰动后, 电压依旧跌落至 0 V。保持比例系数不变, 增大积分系数 K_{i1} 至 400, 由图 9 可知, 电压在大扰动结束后跌至 0V, 系统失稳。两种情况下, $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL}$ 均 < 0 , 能够判断出系统无法维持稳定状态。

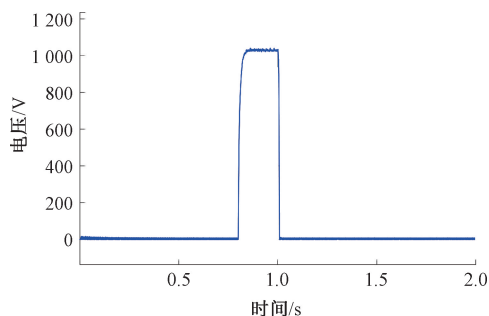


图 8 $K_{p1} = 22, K_{i1} = 100$ 时直流侧电容电压

Fig. 8 $K_{p1} = 22, K_{i1} = 100$ DC side capacitor voltage

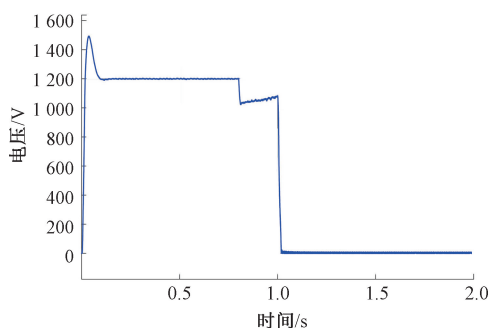


图 9 $K_{p1} = 12, K_{i1} = 400$ 时直流侧电容电压

Fig. 9 $K_{p1} = 12, K_{i1} = 400$ DC side capacitor voltage

由此可知, 网侧电压环的比例参数或积分参数的增大, 会导致大扰动后, 系统的稳定性降低。

2) 网侧电流环对 PMSG 风机暂态稳定性的影响

当 PMSG 风机在表 1 的参数下稳定运行时, 电流环的比例参数 $K_{p2} = 12$, 积分参数 $K_{i2} = 1$ 。保持积分参数不变, 增大比例参数 K_{p2} 至 120, 如图 10 所示, 大扰动结束后, 超调量增大, 而网侧电流波形变化不大, 因此系统仍处于稳定状态。同样, 根据稳定判据 $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} > 0$ 可以看出大扰动后, 系统仍能维持稳定状态。

保持比例参数不变, 增大积分参数 K_{i2} 至 10, 得到

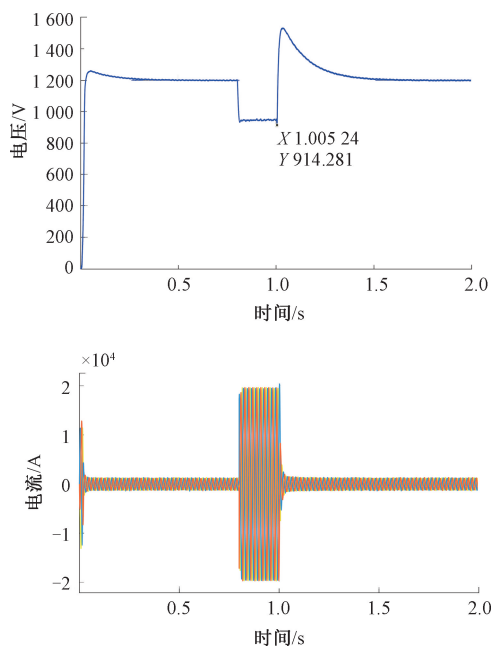


图 10 $K_{p1} = 120, K_{i1} = 1$ 时直流侧电容电压和网侧电流

Fig. 10 $K_{p1} = 120, K_{i1} = 1$ DC side capacitor voltage and grid side current

图 11 所示波形图, 系统大扰动结束后, 超调量降低, 电压恢复目标值速度减慢, 而网侧电流波形经大扰动后基本恢复, 所以系统处于稳定状态。根据稳定判据可知 $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} > 0$, 能够判断出系统处于稳定状态。

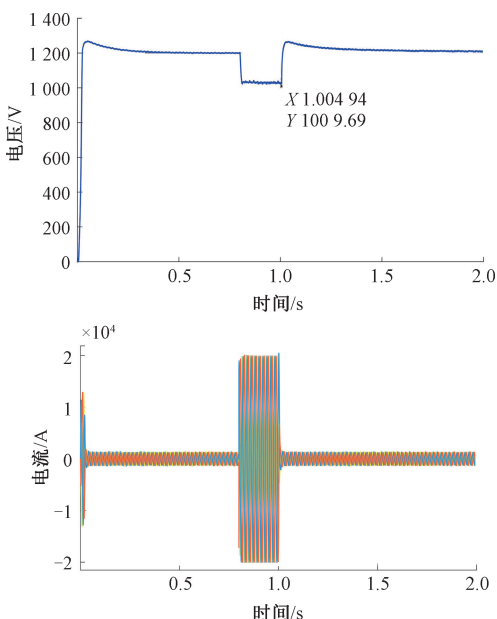


图 11 $K_{p1} = 12, K_{i1} = 10$ 时直流侧电容电压和网侧电流

Fig. 11 $K_{p1} = 12, K_{i1} = 10$ DC side capacitor voltage and grid side current

网侧电压环 PI 控制的比例参数的变化与大扰动后的超调量有关, 积分参数的变化与大扰动后达到目标值

的速度有关,但二者均对系统稳定性影响不大。

3.2 故障时间对 PMSG 风机暂态稳定性的影响

本文研究 PMSG 风机在大扰动下的暂态稳定性,因此,采用三相接地故障代替故障类型^[21]。改变故障时间长短用以模拟故障严重程度,研究在中时故障($t < 100 \text{ ms}$)和长时故障($t < 1 \text{ s}$)PMSG 风机暂态稳定性。

设定 80 ms 中时故障如图 12 所示。

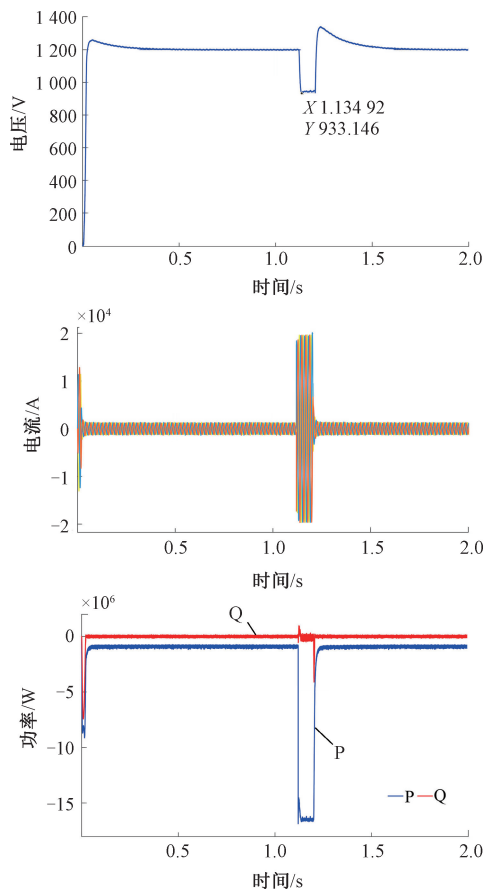


图 12 中时故障时直流侧电容电压、网侧电流与功率图

Fig. 12 Dc-side capacitance voltage, grid-side current and power diagram during Medium-time fault

受到 80 ms 的中时故障后,仿真结果表明电压仍能恢复至原状态,电流和功率经过大扰动后依旧保持原值输出,系统能够处于稳定状态。同样,根据稳定判据 $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} > 0$ 计算表明,中时故障不会对系统稳定性造成影响。

设定 400 ms 长时故障如图 13 所示。

网侧电流经长时故障大扰动后持续降低,并在最后出现骤增现象,而有功功率和无功功率均出现大幅震荡,以及末端的跌落和抬升,均表明在长时故障产生后系统失稳;同理,稳定判据 $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} < 0$,系统经历 400 ms 的长时故障后失稳,直流侧电容电压在大扰动后继续跌落,之后迅速抬升。

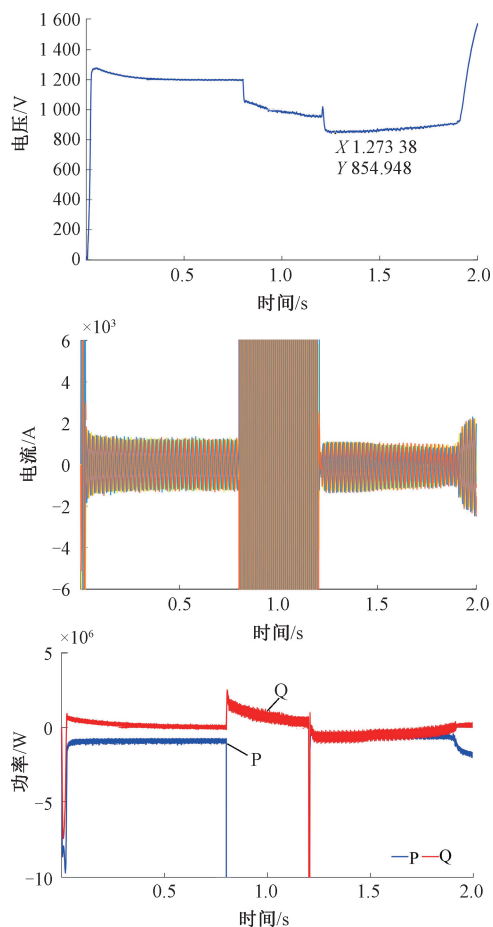


图 13 长时故障时直流侧电容电压、网侧电流与功率图

Fig. 13 Dc-side capacitance voltage, grid-side current and power diagram during long-term fault

由此可知,故障时间长短能够影响系统稳定性,根据仿真可知,故障时间越长,直流侧电容电压越难以恢复,系统暂态稳定性越差。

3.3 故障深度对 PMSG 风机暂态稳定性的影响

故障深度分为深度故障和浅度故障。调整三相故障模块故障电阻阻值以模拟故障深度。调整阻值至浅度故障区得到的直流侧电容电压如图 14 所示;调整阻值至深度故障区得到的直流侧电容电压如图 15 所示。

由此可知,在系统处于浅度故障时,直流侧电压波动微小,且能快速恢复至原值,因此,系统在浅度故障的大扰动过后仍处于稳定状态;而在深度故障过后,大扰动后的网侧电流值发生改变,功率出现震荡,系统无法达到稳定状态。根据稳定判据可知, $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} < 0$,系统产生深度故障后无法继续稳定运行,进一步验证了上述结论。

由此可知,浅度故障对 PMSG 暂态稳定性影响很小,但深度故障会造成系统大扰动后的失稳。

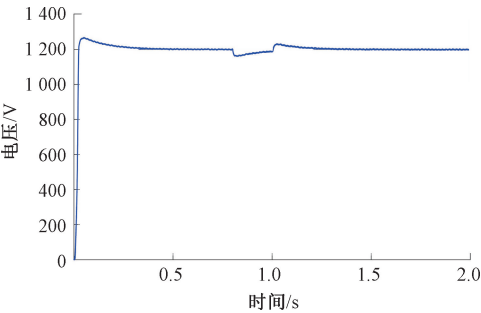


图 14 浅度故障时直流侧电容电压

Fig. 14 Dc-side capacitor voltage in shallow fault

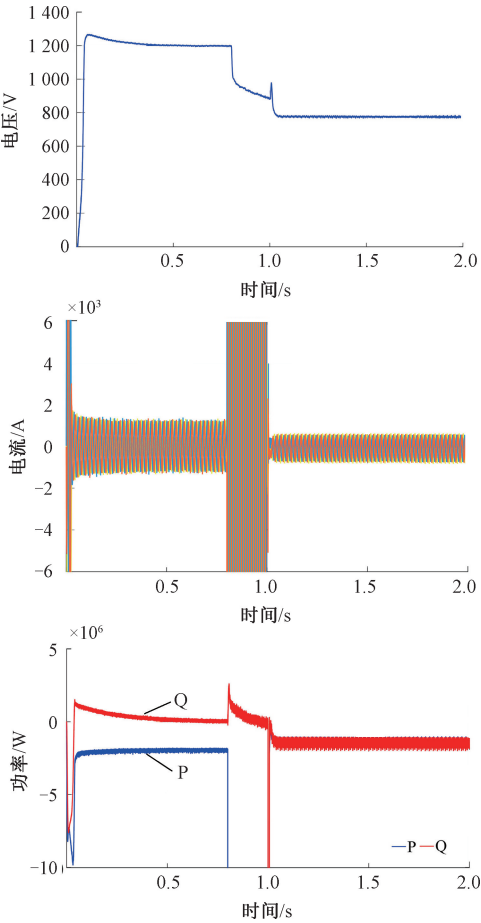


图 15 深度故障时直流侧电容电压

Fig. 15 Dc-side capacitor voltage in deep fault

3.4 风速对 PMSG 风机暂态稳定性的影响

PMSG 风机暂态过程会在很短时间内停止,因此,风速的改变对系统暂态稳定性的影响可以忽略不计。然而,不同的风速对 PMSG 风机的运行状况影响不同,针对 2WM 的 PMSG 风机,取 5 m/s 的低风速和 28 m/s 的极端风速分析系统暂态稳定性,如图 16 所示。

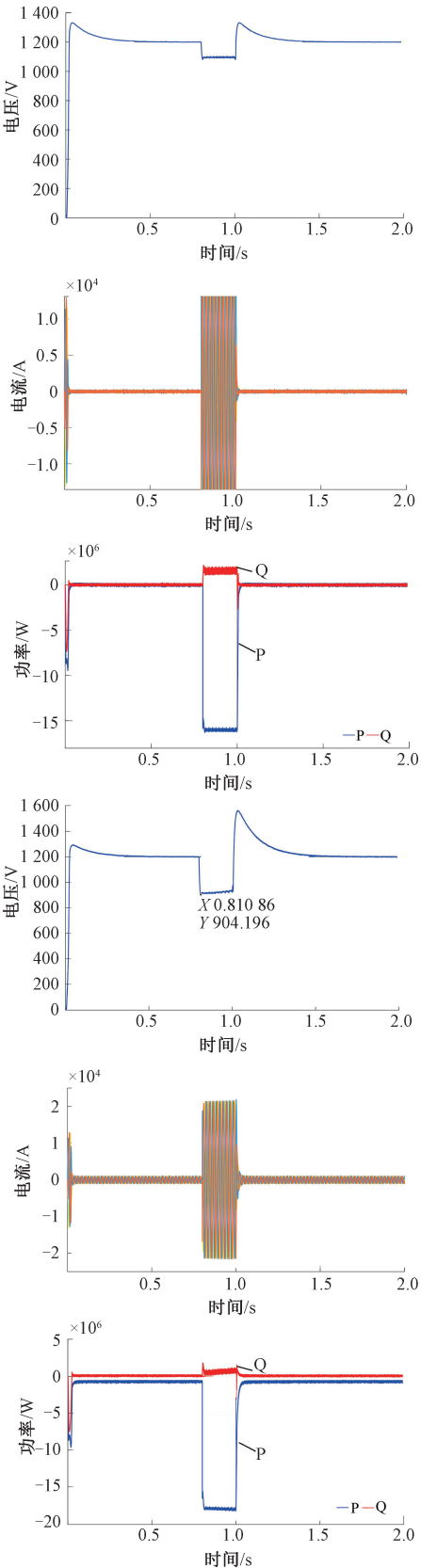


图 16 风速 5、28 m/s 时电压、电流、功率波形图

Fig. 16 Wind speed 5, 28 m/s voltage, current, power waveform diagram

由图16可知,5和28 m/s的风速下,在承受大扰动过后,网侧电流波形和网侧功率波形均可以恢复至原来的运行状态,系统能够保持稳定运行。并且根据稳定判据 $CV_c^2 R_1 - L_1 P_{CPL} > 0$ 也得到了上述结论。

因此,随着风速增加,直流电容电压跌落越深,当风速达到极端风速时,电压趋近于系统暂态稳定的临界值;并且,风速增大会造成大扰动后的超调量增大。

4 结 论

本文基于混合势函数建立了 PMSG 风机简化模型,分析了大扰动下 PMSG 风机的主要控制参数对系统暂态稳定性的影响,得出的结论如下:

1) 根据混合势函数简化 PMSG 风机系统,得到了 PMSG 风机暂态稳定判据,并结合网侧电流波形和网侧功率波形,进一步验证系统在大扰动过后的暂态稳定性。

2) 网侧变流器 PI 环节电压环的比例积分参数的越大、故障时间越长、故障深度越深均会直接导致 PMSG 风机在大扰动过后失稳,而风速的增加会导致直流侧电容电压大扰动波形跌落越深,极端的风速也会使系统呈现失稳趋势。

参考文献

- [1] GONZALO A P, BENMESSAOUD T, ENTEZAMI M, et al. Optimal maintenance management of offshore wind turbines by minimizing the costs[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52(C): 1-10.
- [2] 郝治国,谢凡,张雨宁,等. 远海风电直流汇集送出系统直流线路继电保护技术现状与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 1-18.
HAO ZH G, XIE F, ZHANG Y N, et al. Current status and prospect of DC line relay protection technology for offshore wind power DC converging and sending system [J]. High Voltage Technology, 2019, 49(1): 1-18.
- [3] 赵君宇,高山,徐路,等. 考虑台风影响的海上风电机组双层检修策略[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 121-130.
ZHAO J Y, GAO SH, XU L, et al. Two-deck maintenance strategy for offshore wind turbines considering typhoon effects [J]. Electric Power Construction, 2019, 44(7): 121-130.
- [4] 何怡刚,谢望,施天成,等. 基于畸变电流的直驱式永磁风电变流器故障诊断研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 20-28.
HE Y G, XIE W, SHI T CH, et al. Research on fault diagnosis of direct-driven permanent magnet wind power converter based on distorted current [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 20-28.
- [5] 张金玉,季鑫源,何贵先,等. 风电机组多重雷击暂态过电压分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3): 153-160.
ZHANG J Y, JI X Y, HE G X, et al. Analysis of transient overvoltage of multiple lightning strikes in wind turbine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(3): 153-160.
- [6] 叶瑞丽,刘瑞叶,刘建楠,等. 直驱风电机组风电场接入后的电力系统暂态稳定计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 211-218.
YE R L, LIU R Y, LIU J N, et al. Transient stability calculation of power system after direct drive wind turbine wind farm access [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 211-218.
- [7] 金晓航,孙毅,单继宏,等. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1041-1053.
JIN X H, SUN Y, SHAN J H, et al. Research review on fault diagnosis and prediction technology of wind turbine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1041-1053.
- [8] 刘忠义,刘崇茹,李庚银. 适用于暂态稳定分析的直驱永磁风机建模研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 96-102.
LIU ZH Y, LIU CH R, LI G Y. Research on modeling of direct-driven permanent magnet fan for transient stability analysis [J]. Power Grid and Clean Energy, 2016, 32(2): 96-102.
- [9] 肖园园,李欣然,张元胜,等. 直驱永磁同步风力发电机的等效建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 12-17.
XIAO Y Y, LI X R, ZHANG Y SH, et al. Equivalent modeling of direct-driven permanent magnet synchronous wind Turbine [J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2013, 25(1): 12-17.
- [10] MAHMOUD M M, ATIA B S, ABDELAZIZ A Y, et al. Dynamic performance assessment of PMSG and DFIG-based WECS with the support of manta ray foraging optimizer considering MPPT, pitch control, and FRT capability issues[J]. Processes, 2022, 10(12): 2723.
- [11] 罗魁,郭剑波,马士聪,等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3691-3703.
LUO K, GUO J B, M SH C, et al. Review on reliability analysis and key technologies for improving grid-connected offshore wind power [J]. Power Grid Technology, 2012, 46(10): 3691-3703.
- [12] 袁豪. 风电机组直流电压控制尺度的幅相运动方程建模及其稳定性分析应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

- YUAN H. Modeling of amplitude-phase motion equation for DC voltage control scale of wind turbine and its application to stability analysis [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [13] 纪泰鹏, 赵伟, 李永达, 等. 基于能量函数法的含虚拟惯性控制直驱风电场内部暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 38-48.
- JI T P, ZHAO W, LI Y D, et al. Transient synchronous stability analysis of direct drive wind farm with virtual inertia control based on energy function method [J]. Power System Protection and Control, 2012, 50(22): 38-48.
- [14] 王义, 江汉红, 邢鹏翔. 风电机组虚拟惯量一阶自抗扰控制研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 153-163.
- WANG Y, JIANG H H, XING P X. Research on virtual inertia first-order active disturbance rejection control for wind turbines [J]. Journal of Solar Energy, 2020, 41(4): 153-163.
- [15] 姜惠兰, 周照清, 蔡继朝. 风电接入比例对电力系统暂态功角稳定性影响的分析方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 53-67.
- JIANG H L, ZHOU ZH Q, CAI J CH. Analysis method of influence of wind power access ratio on transient power angle stability of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 53-67.
- [16] 郭高鹏, 方佳良, 豆书亮, 等. 考虑海上风电接入的电网侧无功补偿策略[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 65-70.
- GUO G P, FANG J L, DOU SH L, et al. Grid-side reactive power compensation strategy considering offshore wind power access [J]. Power Grid and Clean Energy, 2018, 34(12): 65-70.
- [17] 徐力, 王刚, 侍乔明, 等. 直驱永磁风电机组电压暂态简化建模及仿真[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(9): 47-51.
- XU L, WANG G, SHI Q M, et al. Simplified voltage transient modeling and simulation of direct-driven permanent magnet wind turbine [J]. Electric Machines and Control Applications, 2015, 42(9): 47-51.
- [18] 赵骞, 邵一川, 姚兴佳, 等. 风电机组基于最优跟踪路径的改进型 MPPT 控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 282-289, 394.
- ZHAO Q, SHAO Y CH, YAO X J, et al. Improved MPPT control of wind turbine based on optimal tracking path[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 282-289, 394.
- [19] 代林旺, 秦世耀, 王瑞明, 等. 直驱永磁同步风电机组高电压穿越技术与试验[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 147-154.
- DAI L W, QIN SH Y, WANG R M, et al. Research and experiment on high voltage crossing technology of direct drive permanent magnet synchronous wind Turbine [J]. Power Grid Technology, 2018, 42(1): 147-154.
- [20] ZHAO W, ZHENG J, HAN Z, et al. Large - disturbance stability analysis method based on mixed potential function for AC/DC hybrid distribution network with PET [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(18): 3802-3813.
- [21] SOUED S, RAMADAN H S, BECHERIF M. Effect of doubly fed induction generator on transient stability analysis under fault conditions [J]. Energy Procedia, 2019, 162: 315-324.

作者简介



李鑫, 2003 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为人工智能、智能电网理论与技术。

E-mail: lixinyz@126.com

Li Xin received her B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2003, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2006, and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016, respectively. Now she is a professor in Liaoning Technical University. Her main research interests include artificial intelligence and smart grid theory and technology.



孙洋, 2020 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

E-mail: 1825881187@qq.com

Sun Yang received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Liaoning Technical University. His main research interests include electric power system and its automation.



杨桢, 2002 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学电气与控制工程学院教授, 主要研究方向为智能电网理论与技术、电磁环境科学与技术、电力电子与电力传输控制技术。

E-mail: yangzhen1980219@163.com

Yang Zhen received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2002, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2006, and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016, respectively. Now he is a professor in Faculty of Electrical and Control Engineering in Liaoning Technical University. His main research interests include smart grid theory and technology, electromagnetic environment science and technology, power electronics and electrical transmission control technology.