

基于混合势函数法的陆上风电全直流发电系统大扰动稳定性分析

彭岩清, 李凤婷, 尹纯亚
(新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830017)

摘要: 陆上风电全直流发电系统能够有效解决大规模风电并网过程中谐波谐振、无功功率传输等问题, 但系统中电力电子设备种类多且各设备的控制耦合复杂, 其大扰动下的暂态稳定性机理与传统交流系统不同。为了探究陆上风电全直流发电系统的大扰动稳定性机理, 首先, 针对“直流汇集—交流送出”方案, 基于全直流系统中关键设备的运行特性及控制策略建立了系统等效模型。然后, 基于Brayton-Moser混合势函数理论分析了陆上风电全直流发电系统的大扰动稳定性机理, 通过求解稳定性判据分析关键参数对系统大扰动稳定性的影响, 结果表明系统的稳定性与各变流器的系统参数和控制参数均有关联。最后, 基于MATLAB/Simulink搭建仿真模型, 验证了理论分析的正确性。
关键词: 全直流发电系统; 直流汇集; 混合势函数法; 稳定域; 大扰动稳定性分析

Large Disturbance Stability Analysis of Onshore Wind Power Full DC Power Generation System Based on Mixed Potential Function

PENG Yanqing, LI Fengting, YIN Chunya
(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: Onshore wind power full DC power generation system can effectively solve the problems of harmonic resonance and reactive power transmission in the process of grid-connected large-scale wind power. But the transient stability mechanism under large disturbances is different from the traditional AC system due to the many types of power electronic devices and the complex control coupling of each device in the system. In order to investigate the large disturbance stability mechanism of onshore wind power full DC power generation system, firstly, the system equivalent model is established based on the operation characteristics and control strategy of key equipment in the full DC system for the scheme of "DC convergence-AC output". Then, based on the Brayton-Moser mixed potential function theory, the large disturbance stability mechanism of the onshore wind power full DC power generation system is analyzed. By solving stability criterion, the influence of key parameters on the system large disturbance stability is analyzed. The results show that the stability of the system is related to both the system parameters and control parameters of each converter. Finally, a simulation model is built based on MATLAB/Simulink to verify the correctness of the theoretical analysis.
Key words: full DC power generation system; DC convergence; mixed potential function method; stability region; large disturbance stability analysis

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 电力系统中的风电占比大幅提高; 目前投运的陆上风电系统多采用“交流汇集—交流送出”接入方案, 存在电压与频率稳

定、暂态过电压等问题^[1-3], 影响接入系统的稳定可靠运行, 阻碍风电超大规模化开发利用。近期相关专家提出的陆上风电全直流发电(onshore wind power full DC power generation, OWP-FDCG)系统, 采用直流型风机^[4]将风能直接转化为直流电, 经逆变器送出, 具有汇集损耗低、无需无功功率补偿等优点^[5-7], 在稳定、可靠等方面具有显著优势^[8-9]。但是OWP-FDCG系统电力电子化程度高,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB1507001)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China(2021YFB1507001)。

直流设备之间的耦合程度高,运行状态变化频繁且变化范围大,故障特性复杂,导致全直流系统的稳定性机理尚不清晰^[10],影响全直流风电技术的推广应用。

全直流风力发电技术最早应用于海上风力发电,相关研究主要集中在大容量海上风机、大容量直流设备的设计及其控制方面。陆上全直流系统目前还处于研究示范阶段,相关的研究文献较少。文献[8]提出了一种OWP-FDCG拓扑结构优化设计方法,评估了所提拓扑的可靠性和经济性,结果表明全直流发电系统在更大规模风电场中仍具有经济性优势。文献[11-12]分别采用状态空间法和阻抗法研究了OWP-FDCG的小扰动稳定性机理,对影响系统小扰动稳定的主导参数进行了识别。但是针对OWP-FDCG的大扰动稳定性机理研究较少。

时域仿真法和李雅普诺夫法是电力系统大扰动稳定性分析的常用方法^[13-14]。时域仿真法较为耗时且无法反映出系统大扰动稳定性的内在机理^[15]。李雅普诺夫法目前被认为是分析电力系统大扰动稳定性最有效的方法之一^[16],采用该方法的关键在于构造合适的李雅普诺夫函数。常用混合势函数法和Takagi-Sugeno(T-S)模糊法^[17]来构造系统的李雅普诺夫函数。T-S模糊法能够提供可靠的稳定性预测,但无法得到定量的稳定性判据,只能对特定的系统进行大扰动稳定性分析,对于阶数较高的非线性系统会造成无法求解的问题^[18],因此该方法多用于低阶系统的大扰动稳定性分析。相比之下,混合势函数法不仅能够得到解析形式的稳定性判据,还能准确刻画系统的稳定边界,被广泛应用于高阶电力系统(如柔性直流输电(voltage sourced converter - high voltage direct current, VSC-HVDC)系统、级联变换器系统)的大扰动稳定性分析。

文献[19]分析了混合势函数在直流微网系统的应用,揭示了不同系统参数对稳定性的影响,得出在下垂控制下直流微电网中电源的出力大小、不同变流器的控制参数和系统部分主电路参数均会对大扰动后系统的动态特性造成不同的影响。文献[20]利用混合势函数法分别分析了直流微网中储能充放电时的大扰动稳定性,当储能充电和放电时直流微网的稳定性判据和稳定域并不相同,由此得出系统拓扑结构改变后其稳定性也会随之改变的结论。文献[21]利用混合势函数分析了大扰动下VSC-

HVDC系统的稳定性,并分析了不同参数对系统稳定性的影响。文献[22]利用混合势函数法分析了多级变换器级联系统在不同控制模式下的大扰动稳定性,双闭环控制下系统的稳定域更大。文献[23]将混合势函数应用于配电网智能软开关系统电网电压暂降工况下的稳定性分析中,并基于虚拟电容器控制策略提出了稳定性提升方法。文献[24]分析了并网型直流微电网大扰动稳定性判据保守性的机理。通过对比混合势函数法得出的大扰动稳定性判据和李雅普诺夫间接法得出的小扰动稳定性判据的关联性,验证了基于混合势函数法求解稳定性判据的正确性。文献[25]针对构网型并网逆变器在大扰动下易产生暂态失稳的问题,分析了单电压外环控制构网型并网逆变器在电网电压突变工况下的动态响应。文献[26-27]基于混合势函数理论分析了永磁同步风力发电机大扰动下的暂态稳定性,并调整风机各参数分析了永磁同步电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。综上所述,现有研究主要集中在直流微网、级联系统和交流传输系统的大扰动稳定性,基于混合势函数法的陆上风电全直流系统的大扰动稳定性分析较少,且未考虑多个风电场协同作用下系统的大扰动稳定性机理。

针对上文所分析的问题,本文采用混合势函数理论研究了OWP-FDCG遭遇负荷突变时系统的大扰动稳定性。首先,基于系统的拓扑结构和机侧换流器(machine-side converter, MSC)、双有源桥DC-DC变换器(dual active bridge, DAB)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)等系统核心电子器件的运行特性及控制策略建立OWP-FDCG的等效模型。在此基础上,基于混合势函数理论构造系统的混合势函数模型,通过模型求解提出系统大扰动稳定判据。基于稳定性判据分析明确OWP-FDCG主要电子器件及其控制参数对系统大扰动稳定性的影响,并搭建OWP-FDCG的仿真模型,验证理论分析的正确性。

1 OWP-FDCG的结构

OWP-FDCG按照汇集和送出方式可分为“直流汇集一直流送出”和“直流汇集—交流送出”两种方案^[8]。本文研究的OWP-FDCG位于远离负荷中心的沙戈荒地区,从能量损耗及当前技术可操作性的

角度考虑,图1所示的“直流汇集—交流送出”方案无需建设大容量直流升压站,可直接汇入现有的交流输电线路,建设难度和投资成本小,更具优势。本文以该方案为例研究 OWP-FDCG 大扰动稳定性。

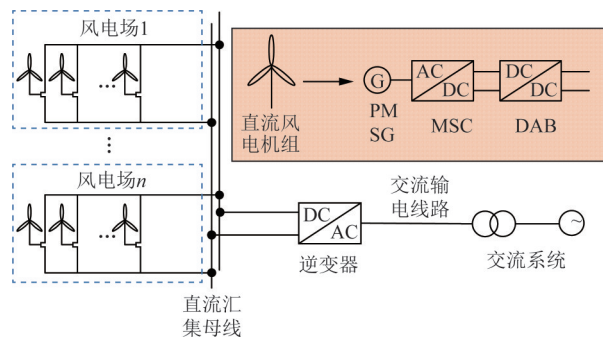


图1 OWP-FDCG 汇集与送出方案

Fig. 1 OWP-FDCG convergence and output scheme

全直流系统由风电场、MMC并网逆变器、交流输电线路和交流系统构成。每个风电场由多台直流风电机组并联构成,直流风电机组(DC Wind turbine, DCWT)由永磁同步电机(permanent magnet synchronous generators, PMSG)、MSC和DAB构成。PMSG输出的电能经MSC整流馈入DAB升压为中压直流电,经中压直流线路汇集,通过MMC逆变后经交流输电线路送出,最后并入交流系统。OWP-FDCG与交流系统的优缺点如表1所示。

表1 OWP-FDCG与交流系统的优缺点

Tab. 1 Advantages and disadvantages of OWP-FDCG and AC system

特性	输电容量	传输效率	电能质量	系统稳定性
OWP-FDCG	大	较高	较好	较好
交流系统	小	较低	较差	易受到影响

2 OWP-FDCG 关键设备模型及其控制策略

全直流系统中,电力电子变压器开关动作频繁、非线性程度较高。平均值模型通过简化元件内部的开关过程对其外特性进行建模,减小计算量的同时能够较为准确获取电气元件输入输出特性,虽然无法得知电气元件的内部状态,但不会对大扰动稳定性分析造成较大的影响。因此本文采取平均值模型来分析系统的大扰动稳定性,首先计算各器件

一个周期中输出的平均电压和电流,建立各器件的平均值模型,再建立系统的等效模型。

OWP-FDCG系统中, MSC采用基于转子磁链定向的转速外环电流内环矢量控制策略,控制发电机有功功率实现最大功率跟踪。DAB采用PI控制器控制占空比,经过角度转换后得到原副边两侧的移相角,进而控制直流电压稳定。MMC的稳压控制通过电压外环,电流内环控制稳定直流母线电压。

2.1 DCWT的模型及控制策略

DCWT由PMSG、MSC和DAB串联构成,PMSG通常运行在最大功率跟踪模式下,其控制和运行机理本文不再进行分析。

1) MSC的模型及控制策略

MSC将PMSG输出的交流电整流为5kV的低压直流电,拓扑结构如图2所示。图中 e_{sx} , i_{sx} , u_{sx} ($x=a, b, c$)分别表示PMSG的转子磁链感应电动势、定子电流、变流器相电压; R_s 为定子电阻; L_s 为定子电感与滤波电感的等效电感; u_{ldc} 和 i_{dc} 分别为MSC出口电压、电流。

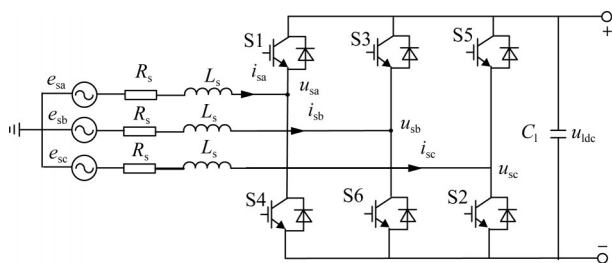


图2 PMSG和MSC的拓扑结构

Fig. 2 Topology of PMSG and MSC

基于Park-Clarke变换, MSC在 dq 旋转坐标系中的模型为:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} = e_{sd} - R_s i_d - u_d + \omega L_s i_q \\ L_s \frac{di_q}{dt} = e_{sq} - R_s i_q - u_q - \omega L_s i_d \\ C_1 \frac{du_{ldc}}{dt} = \frac{3(u_d i_d + u_q i_q)}{2u_{ldc}} - i_l \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 u_{sx} ($x=a, b, c$)和 i_{sx} ($x=a, b, c$)经过 dq 变换后所得到的相应分量。

基于MSC的控制策略,其 d 轴电压和 q 轴电压可以表示为:

$$\begin{cases} u_d = k_{vdp}(i_{dref} - i_d) + k_{vdi} \int (i_{dref} - i_d) dt \\ u_q = k_{vqp}(i_{qref} - i_q) + k_{vqi} \int (i_{qref} - i_q) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_{vdp} 和 k_{vdi} 分别为 d 轴电压环的比例和积分系数; k_{vqp} 和 k_{vqi} 分别为 q 轴电压环的比例和积分系数。

2) DAB 的拓扑及其控制策略

DAB 将 MSC 输出的 5 kV 低压直流升压为 30 kV 中压直流, 拓扑结构如图 3 所示。

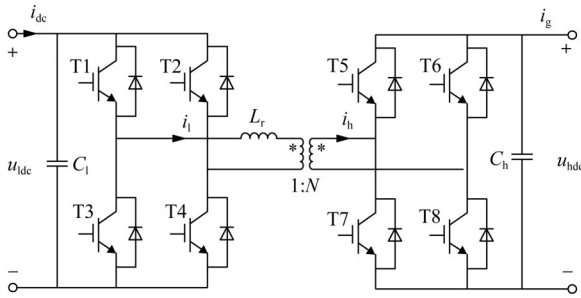


图 3 DAB 拓扑结构图

Fig. 3 DAB topology diagram

图 3 中, u_{ldc} 和 u_{hd} 分别为 DAB 输入侧直流电压和输出侧直流电压; i_{dc} 、 i_g 、 C_1 、 C_h 分别为输入侧电流、输出侧电流、输入侧稳压电容和输出侧稳压电容; i_l 和 i_h 分别为 DAB 原边和副边 H 桥流过的电流; N 为理想变压器变比; L_r 为滤波电感与变压器漏感的等值电感; T1—T8 为 DAB 原边侧和副边侧的 IGBT。基于平均化建模方法, DAB 输入侧电流和输出侧电流的表达式为:

$$\begin{cases} i_l = \frac{Nd(1-d)u_{hd}}{2f_s L_r} \\ i_h = \frac{Nd(1-d)u_{ldc}}{2f_s L_r} \end{cases} \quad (3)$$

式中: d 为原边 H 桥和副边 H 桥的移相比; f_s 为开关频率。

DBA 采用电压外环控制, 将电压参考值与电压实际值作差经 PI 调节器输出移项比 d , 可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{df_u}{dt} = u_{ldcref} - u_{ldc} \\ d = k_{dp}(u_{ldcref} - u_{ldc}) + k_{di} f_u \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_{dp} 和 k_{di} 分别为电压环 PI 控制器的比例系数和积分系数; u_{ldcref} 为 MSC 输出侧的电压参考值; f_u 为 MSC 输出电压参考值和实际值差值的积分项。

2.2 MMC 拓扑及其控制策略

多个风电场的电能可在直流汇集母线处汇集, 经 MMC 逆变后由交流输电线路送出, 其拓扑结构如图 4 所示。

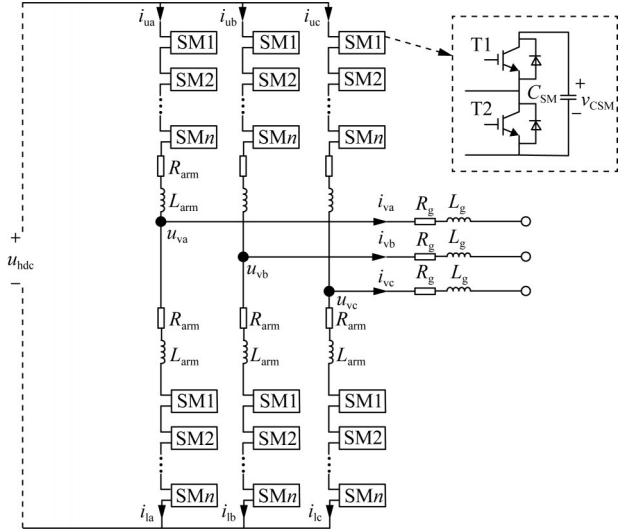


图 4 MMC 拓扑结构图

Fig. 4 MMC topology diagram

图 4 中 u_{hd} 为直流电压, R_{arm} 、 L_{arm} 分别为桥臂等效电阻和桥臂等效电感, R_g 、 L_g 分别为交流侧等效电阻和等效电感, i_{ux} 、 i_{lx} 、 i_{vx} 、 u_{vx} ($x=a, b, c$) 分别为上桥臂电流、下桥臂电流、输出侧交流电流、输出侧交流电压。

基于 MMC 上桥臂和下桥臂的电压方程将两方程作差得到差模电压和共模电压, 对其化简可得到 MMC 直流侧的数学模型为:

$$L_{arm} \frac{di_{cirj}}{dt} = u_{comj} - \frac{u_{hd}}{2} - R_{arm} i_{cirj} \quad (5)$$

式中: u_{comj} ($j=a, b, c$) 为 j 相上下桥臂的共模电压; i_{cirj} 为 j 相的环流。对式(6)化简可得 MMC 直流侧等效模型为:

$$\frac{2}{3} L_c \frac{di_c}{dt} + \frac{2}{3} R_c i_c = u_{c_{eq}} - u_{hd} \quad (6)$$

式中: $u_{c_{eq}}$ 为等效电容两端的电压; L_c 、 R_c 、 i_c 分别为 MMC 的等效电感、等效电阻和 MMC 输出电流。

MMC 电压外环电流内环控制, 其内环电流 i_{tdref} 参考值为:

$$\begin{aligned} i_{tdref} = & k_{mp}(u_{hdcref} - u_{hd}) + \\ & k_{mi} \int (u_{hdcref} - u_{hd}) dt \end{aligned} \quad (7)$$

式中: k_{mp} 和 k_{mi} 分别为 MMC 电压外环控制的比例系

数和积分系数； u_{hdcref} 为MMC输入侧电压参考值。

为减小模型的复杂度，缩短仿真时间，本文采用单机等值的方法对每个风电场群进行等效。基于式(1)、(3)、和(6)建立OWP-FDCG系统的等效模型，如图5所示。

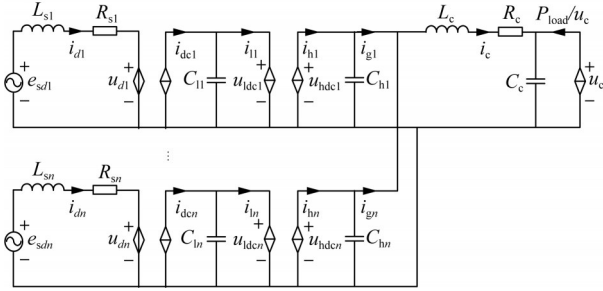


图5 OWP-FDCG系统等效模型

Fig. 5 Equivalent model of OWP-FDCG

3 OWP-FDCG大扰动稳定性分析

3.1 混合势函数法

混合势函数法能够直观地在稳定判据中得出系统各部分参数对系统稳定性的影响，在电力系统大扰动稳定性分析中得到了广泛的应用。基于混合势函数理论，建立混合势函数模型的步骤可分为3步：第一步，构造系统中所有非储能电气元件的能量函数；第二步，构造系统中所有电容元件的能量函数，即电容支路上电压与电流的乘积；第三步，将两者相加，即可得到系统的混合势函数模型。混合势函数的一般形式为：

$$P(i, v) = -A(i) + B(v) + i^T \cdot \Lambda \cdot v \quad (8)$$

式中： i 和 v 分别为电压和电流； $A(i)$ 为电流势函数； $B(v)$ 为电压势函数； Λ 为与系统结构相关的常数矩阵； i 和 v 分别为系统中电流和电压组成的列向量。建立好混合势函数后分别对电容电压和电感电流求偏导，若满足式(9)则证明构造的混合势函数正确。

$$\begin{cases} L \frac{di_\rho}{dt} = \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_\rho} \\ C \frac{dv_\rho}{dt} = -\frac{\partial P(i, v)}{\partial v_\rho} \end{cases} \quad (9)$$

式中： L 、 C 、 i_ρ 和 v_ρ 分别为系统各支路上的电感、电容、电流和电压； ρ 为支路索引变量。

混合势函数理论定义：

$$\begin{cases} \mu_1 = \min \{ \lambda (L^{-1/2} \cdot A_{ii}(i) \cdot L^{-1/2}) \} \\ \mu_2 = \min \{ \lambda (C^{-1/2} \cdot B_{vv}(v) \cdot C^{-1/2}) \} \end{cases} \quad (10)$$

式中： μ_1 和 μ_2 为混合势函数的两个特征值； λ 为矩阵运算符； L 为电路中所有电感组成的对角矩阵， $L = \text{diag}(L_1, L_2, \dots, L_n)$ ， L_n 为第 n 条支路上的电感； C 为所有电容组成的对角矩阵， $C = \text{diag}(C_1, C_2, \dots, C_n)$ ， C_n 为第 n 条支路上的电容； $A_{ii}(i)$ 和 $B_{vv}(v)$ 分别为电流势函数和电压势函数对电压电流求二阶偏微分的结果。

3.2 基于混合势函数法的OWP-FDCG稳定判据

基于图5所示的等效模型建立混合势函数。所有非储能电气元件的电流势函数可以写为：

$$\begin{aligned} \int \sum_{\mu} u_{\mu} di_{\mu} &= \sum_{i=1}^n \int_0^{i_{di}} (e_{sdi} - R_{si} i_{di} - u_{di}) di_{di} + \\ &\sum_{i=1}^n \int_0^{i_{dci}} u_{ldci} di_{dci} - \sum_{i=1}^n \int_0^{i_{li}} u_{ldci} di_{li} + \\ &\sum_{i=1}^n \int_0^{i_{hi}} u_{hdci} di_{hi} + \int_0^{P_{\text{load}}} u_c d \frac{P_{\text{load}}}{u_c} - \int_0^{i_c} R_c i_c di_c \end{aligned} \quad (11)$$

式中：定义 u_{μ} 、 i_{μ} 为第 μ 条支路上的电压和电流； P_{load} 为OWP-FDCG的网侧负载； n 为风电场的数量； e_{sdi} 、 i_{di} 、 u_{di} 、 R_{si} 和 i_{li} ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为第 i 个风电场的机侧电压、MSC的 d 轴电流、MSC的 d 轴电压、MSC等效电阻和MSC输出电流。

所有电容元件包含的能量即电容支路上电压与电流的乘积可以表示为：

$$\begin{aligned} \sum_{\sigma=r+1}^{r+s} v_{\sigma} i_{\sigma} &= \sum_{i=1}^n u_{ldci} (i_{li} - i_{dci}) - u_c (i_c + \frac{P_{\text{load}}}{u_c}) - \\ &\sum_{i=1}^n u_{hdci} (i_{hi} - i_{gi}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中： v_{σ} 、 i_{σ} 分别为第 σ 条支路上的电压和电流； i_{gi} 为第 i 个风电场的输出电流； r 和 s 为电容支路编号。

由图5可知： $u_{\text{hdcl}} = u_{\text{hdcl}2} = \dots = u_{\text{hdcl}n}$ ，统一采用 u_{hdc} 表示，直流汇集母线的电流与每个风电场的输出电流可以表示为， $i_{g1} + i_{g2} + \dots + i_{gn} = i_c$ 。联立式(8)、(11)和(12)，OWP-FDCG的混合势函数为：

$$\begin{aligned} P(i, v) &= \int \sum_{\mu=r+1}^{r+s} u_{\mu} di_{\mu} + \sum_{\sigma=r+1}^{r+s} v_{\sigma} i_{\sigma} \\ &= \sum_{i=1}^n \int_0^{i_{di}} (e_{sdi} - u_{di}) di_{di} - \sum_{i=1}^n \int_0^{i_{hi}} i_{hi} du_{hdc} + \\ &\sum_{i=1}^n \int_0^{i_{dci}} (i_{li} - i_{dci}) du_{ldci} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} R_{si} i_{di}^2 - \\ &\frac{1}{2} R_c i_c^2 - \int_0^{P_{\text{load}}} \frac{P_{\text{load}}}{u_c} du_c - u_c i_c + u_{\text{hdc}} i_c \end{aligned} \quad (13)$$

为了验证混合势函数的正确性，将式(13)代入

式(9)中, 结果如式(14)所示。将式(14)与图 5 的节点电流方程和回路电压方程对比, 验证了所建立的混合势函数模型的正确性。

$$\begin{cases} \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_{di}} = L_{si} \frac{di_{di}}{dt} = e_{sdi} - R_{si} i_{di} - u_{di} \\ \frac{\partial P(i, v)}{\partial u_{ldci}} = -C_{li} \frac{du_{ldci}}{dt} = i_{li} - i_{dci} \\ \frac{\partial P(i, v)}{\partial u_{hdci}} = -C_{hi} \frac{du_{hdci}}{dt} = -i_{hi} + i_{gi} \\ \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_c} = L_c \frac{di_c}{dt} = u_{hdc} - R_c i_c - u_c \\ \frac{\partial P(i, v)}{\partial u_c} = -C_c \frac{du_c}{dt} = -\frac{P_{load}}{u_c} - i_c \\ (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (14)$$

根据混合势函数定理, 电流势函数和电压势函数分别对电流和电压求偏导即可得到表示系统稳定性的特征值。OWP-FDCG 的电流势函数和电压势函数为:

$$A(i) = -\sum_{i=1}^n \int_0^{i_{di}} (e_{sdi} - u_{di}) di_{di} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} R_{si} i_{di}^2 + \frac{1}{2} R_c i_c^2 \quad (15)$$

$$B(v) = \sum_{i=1}^n \int_0^{u_{ldci}} (i_{li} - i_{dci}) du_{ldci} - \int_0^{u_c} \frac{P_{load}}{u_c} du_c - \sum_{i=1}^n \int_0^{u_{hdci}} i_{hi} du_{hdci} \quad (16)$$

将式(15)一(16)代入式(10)中求解 OWP-FDCG 混合势函数的特征值, 忽略求解过程中的高阶微分项, 混合势函数的特征值为:

$$\begin{cases} \mu_1 = \min \left\{ a_1, \dots, a_n, \frac{R_c}{L_c} \right\} \\ \mu_2 = \min \left\{ b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n, \frac{1}{C_c} \left(-\frac{P_{load}}{u_c^2} \right) \right\} \end{cases} \quad (17)$$

式中:

$$\begin{cases} a_i = \frac{k_{vdp1} + R_{si}}{L_{si}} \\ b_i = \frac{1}{C_{li}} \left(\frac{Nu_{hdc} k_{dpi}}{2f_s L_{ri}} - \frac{3u_{di} i_{di}}{2u_{ldci}^2} \right) \\ c_i = -\frac{k_{mp}}{C_{hi} u_{hdc}} \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (18)$$

式中 k_{vdp1} 、 k_{dpi} 、 L_{si} 、 C_{li} 、 C_{hi} 和 k_{mp} 分别为 MSC 电压环控制参数、MSC 电流环控制参数、MSC 等效电

感、DAB 输入侧电容、DAB 输出侧电容和 MMC 电压环控制参数。

由式(17)一(18)可观察到 R_{si} 、 L_{si} 、 C_c 、 L_c 、 P_{load} 以及 k_{vdp1} 等参数均会影响 OWP-FDCG 的大扰动稳定性。

n 个风电场并联汇集的 OWP-FDCG 大扰动稳定充分条件为:

$$\min \left\{ a_1, \dots, a_n, \frac{R_c}{L_c} \right\} + \min \left\{ b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n, \frac{1}{C_c} \left(-\frac{P_{load}}{u_c^2} \right) \right\} > 0 \quad (19)$$

以陆上风电全直流发电的示范工程为背景, 本文分析 3 个风电场并联组成的 OWP-FDCG 系统, 其结构如图 1 所示。基于混合势函数定理, OWP-FDCG 系统的稳定性判据为:

$$\min \left\{ \frac{k_{vdp1} + R_{s1}}{L_{s1}}, \frac{k_{vdp2} + R_{s2}}{L_{s2}}, \frac{k_{vdp3} + R_{s3}}{L_{s3}}, \frac{R_c}{L_c} \right\} + \min \left\{ \frac{1}{C_{11}} \left(\frac{Nu_{hdc} k_{dp1}}{2f_s L_{r1}} - \frac{3u_{d1} i_{d1}}{2u_{ldc1}^2} \right), -\frac{k_{mp}}{C_{h1} u_{hdc}}, \frac{1}{C_{13}} \left(\frac{Nu_{hdc} k_{dp3}}{2f_s L_{r3}} - \frac{3u_{d3} i_{d3}}{2u_{ldc3}^2} \right), -\frac{k_{mp}}{C_{h3} u_{hdc}}, \frac{1}{C_{12}} \left(\frac{Nu_{hdc} k_{dp2}}{2f_s L_{r2}} - \frac{3u_{d2} i_{d2}}{2u_{ldc2}^2} \right), -\frac{k_{mp}}{C_{h2} u_{hdc}}, \frac{1}{C_c} \left(-\frac{P_{load}}{u_c^2} \right) \right\} > 0 \quad (20)$$

式中: L_{s1} 、 R_{s1} 和 C_{s1} 分别为第一个风电场的等效电感、等效电阻和等效电容; L_{s2} 、 R_{s2} 和 C_{s2} 分别为第二个风电场的等效电感、等效电阻和等效电容; L_{s3} 、 C_{s3} 、 R_{s3} 分别为第三个风电场的等效电感、等效电阻和等效电容; C_c 为 MMC 等效电容。

代入系统参数得到 $P_{load} < 135.9$ MW, 即系统临界运行功率为 135.9 MW, 当功率波动不超过临界功率时系统会保持稳定运行, 反之系统失稳。

3.3 OWP-FDCG 的稳定域

由式(20)可知: 影响特征值 μ_1 取值的因素有: 各个风电场 MSC 的电流环控制参数 k_{vdp1} 、MSC 的等效电阻和等效电感 (R_{si} 、 L_{si}) 以及 MMC 的等效电阻和等效电感 (R_c 、 L_c); 影响特征值 μ_2 取值的因素不仅有系统的主电路参数、控制参数和系统功率, 还包含了 DAB 的硬件参数。由于 DAB 中 IGBT 的开关频率、原副边升压比等硬件参数通常在设备设计

和制造阶段就已确定, 这些参数在实际过程中往往不具备可调节性。因此分析此类参数对系统大扰动稳定性的影响, 虽然具有一定的理论价值, 但对工程实施的指导意义相对有限。所以本文主要分析特征值 μ_2 中的主电路参数、控制参数和系统功率对大扰动稳定性的影响。为了讨论 MMC 各参数对系统大扰动稳定性的影响, 取 $\mu_1=R_c/L_c$, $\mu_2=-P_{\text{load}}/C_c u_c^2$ 此时系统的稳定性判据为:

$$P_{\text{load}} < \frac{R_c}{L_c} C_c u_c^2 \quad (21)$$

图 6 为 L_c 、 C_c 和 P_{load} 相关的稳定域, 左下角为稳定区域, 右上角为不稳定区域。

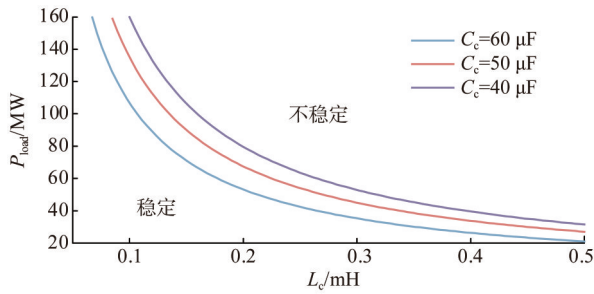


图 6 不同 C_c 下的 L_c - P_{load} 平面中的稳定域

Fig. 6 Stable domains in the L_c - P_{load} plane with different C_c

从图 6 中可以看出当 C_c 从 40 μF 增大到 60 μF , 图中的稳定区域逐渐扩大, 即系统稳定域与 C_c 成正比相关。当 C_c 恒定时, 随着 L_c 减小, 系统能够承受的功率扰动逐渐增大。为了分析风电场内部参数对 OWP-FDCG 大扰动稳定性的影响, 分别从等效过后的风电场控制参数、阻抗参数和系统运行工作点信息中各提取一个参数作为讨论对象。选取 k_{vdpi} 、 L_{si} 和 P_{load} 作为分析对象, 即 $\mu_1=(k_{\text{vdpi}}+R_{\text{si}})/L_{\text{si}}$ 、 $\mu_2=-P_{\text{load}}/C_c u_c^2$ 。此时系统的稳定性判据为:

$$P_{\text{load}} < \frac{k_{\text{vdpi}} + R_{\text{si}}}{L_{\text{si}}} C_c u_c^2 \quad (22)$$

为了研究 k_{vdpi} 和 L_{si} 对系统稳定性的影响, 基于式(22)在图 7 中绘制关于 k_{vdpi} 、 L_{si} 和 P_{load} 的稳定域, 左下角为稳定区域, 右上角为不稳定区域。从图 7 中可以看出, $k_{\text{vdpi}}=13$ 时系统的稳定区域较小, 随着 k_{vdpi} 的增大系统的稳定区域也随之增大, 即稳定区域的大小与 k_{vdpi} 成正比相关。增大 k_{vdpi} 能够使系统的稳定区域扩大, 从而提升系统的稳定性。

进一步研究 R_{si} 、 C_c 和 P_{load} 对系统稳定性的影响, 基于式(22)在图 8 中绘制关于 R_{si} 、 C_c 和 P_{load} 的

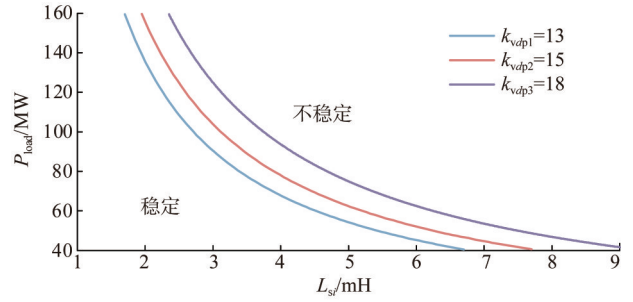


图 7 不同 k_{vdpi} 下的 L_{si} - P_{load} 平面中的稳定域

Fig. 7 Stable domains in the L_{si} - P_{load} plane at different k_{vdpi}

稳定域, 图中右下角为稳定区域, 左上角为不稳定区域。从图 8 中可以看出 R_{si} 从 0.1 增大到 2, 系统的稳定区域也在不断扩大, 即系统稳定域的大小与 R_{si} 成正比相关。因此通过增大 R_{si} 或增大 C_c 均可以有效提升风电场的抗干扰能力, 进而提升 OWP-FDCG 的大扰动稳定性。

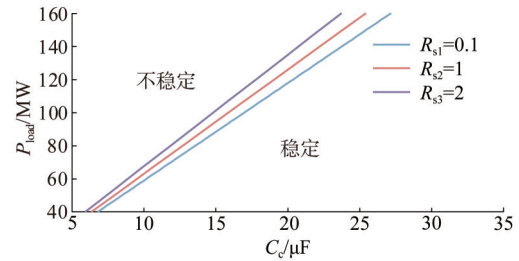


图 8 不同 R_{si} 下的 C_c - P_{load} 平面中的稳定域

Fig. 8 Stability domains in the C_c - P_{load} plane at different R_{si}

4 仿真实验

在 MATLAB/Simulink 中搭建图 1 所示的 OWP-FDCG 仿真模型, 其对应参数如表 2 所示。

为了验证大扰动稳定性判据的正确性, 设置两

表 2 OWP-FDCG 系统主要参数

Tab. 2 OWP-FDCG system main parameters

参数	数值
MSC 等效电感 L_{si}/mH	2
MSC 电阻 R_{si}/Ω	0.1
MSC 电流环控制参数 k_{vdpi}	13
MSC 出口电容 $C_{\text{li}}/\mu\text{F}$	15
DCWT 出口电容 $C_{\text{hi}}/\mu\text{F}$	15
MMC 等效电阻 R_c/Ω	0.3
MMC 等效电感 L_c/mH	0.1
MMC 等效电容 $C_c/\mu\text{F}$	50
网侧电压 u_c/kV	30

组功率大扰动。第一组将网侧功率从 120 MW 突变到 135 MW, 仿真如图 9 所示; 第二组将网侧功率从 100 MW 突变到 130 MW, 仿真波形如图 10 所示。根据理论分析这两组大扰动都满足稳定性判据的功率波动范围, 系统在遭受扰动后不会发生失稳。由图 9—10 可知, 系统在 0.5 s 遭受大扰动后直流汇集点电压和电流均发生波动, 但并未失稳很快达到了新的平衡。两组仿真结果表明: 在临界功率波动范围内, OWP-FDCG 表现出良好的暂态稳定特性, 与稳定判据结果一致, 验证了稳定性判据的正确性。

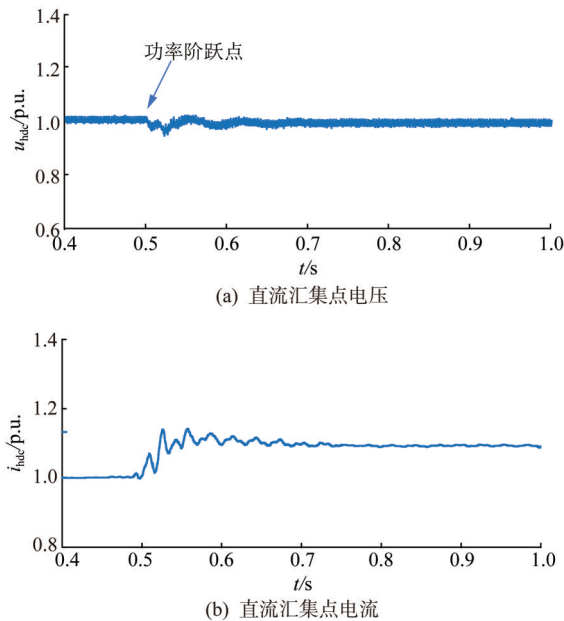


图 9 功率由 120 MW 突变至 135 MW

Fig. 9 Power mutation from 120 MW to 135 MW

设置功率从 120 MW 突变到 140 MW, 直流汇集点的电压电流波形如图 11 所示。

图 11 中由于功率变化不满足稳定性判据, 按照理论分析, 系统将不再保持稳定。图中, $t < 0.5$ s, 系统稳定运行; $t > 0.5$ s, 功率发生突变, 直流汇集点的电压和电流均发生波动, 且一段时间后未达到新的平衡, 系统不再保持稳定, 该结果与稳定性判据分析的结果一致, 进一步验证了稳定性判据的正确性。

根据系统的稳定域图 6 可知, 增大 C_c 能够增大系统稳定域。将 C_c 从 50 μF 调整为 60 μF , 其它参数保持不变, 将功率从 120 MW 突变到 140 MW, 仿真波形如图 12 所示。 $t < 0.5$ s, 系统稳定运行; $t =$

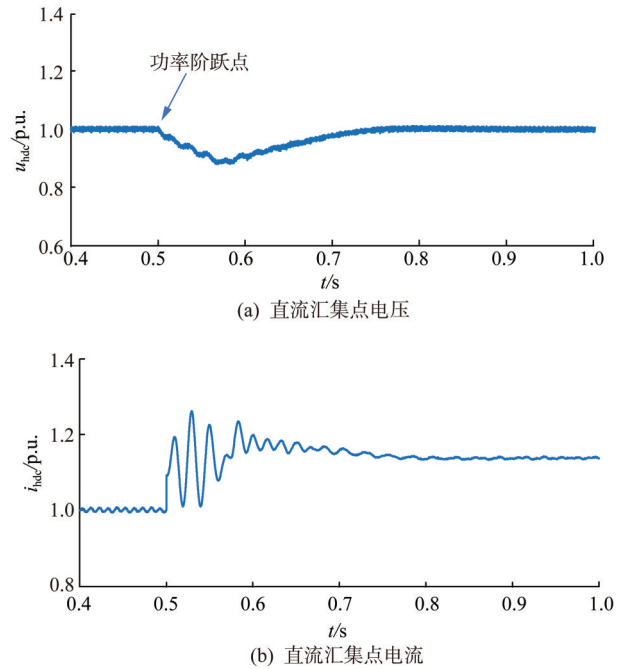


图 10 功率由 100 MW 突变至 130 MW

Fig. 10 Power mutation from 100 MW to 130 MW

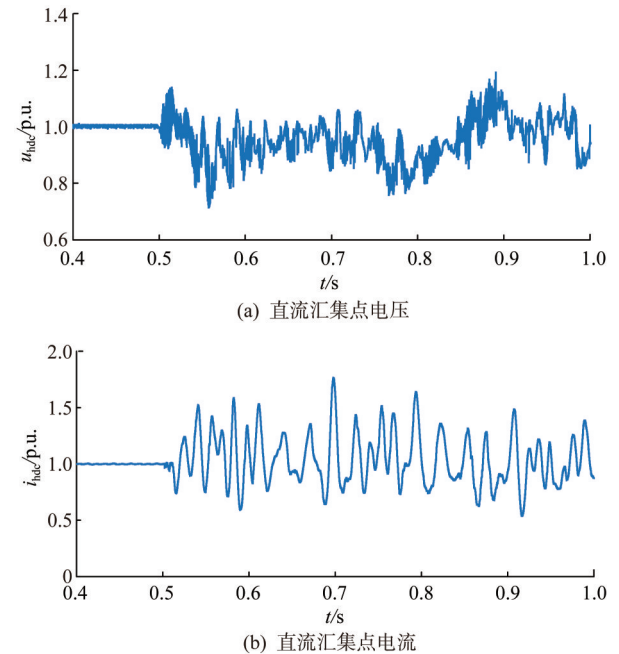


图 11 功率扰动不满足稳定性判据仿真图

Fig. 11 Power perturbation does not satisfy the stability criterion simulation plot

0.5 s, 网侧发生功率突变, 直流汇集点处的电压电流开始波动, 最终电压和电流重新恢复稳定。表明增大 C_c 可以扩大系统的稳定域, 从而提高系统稳定性。

以上仿真通过改变 MMC 的等效电容, 验证了

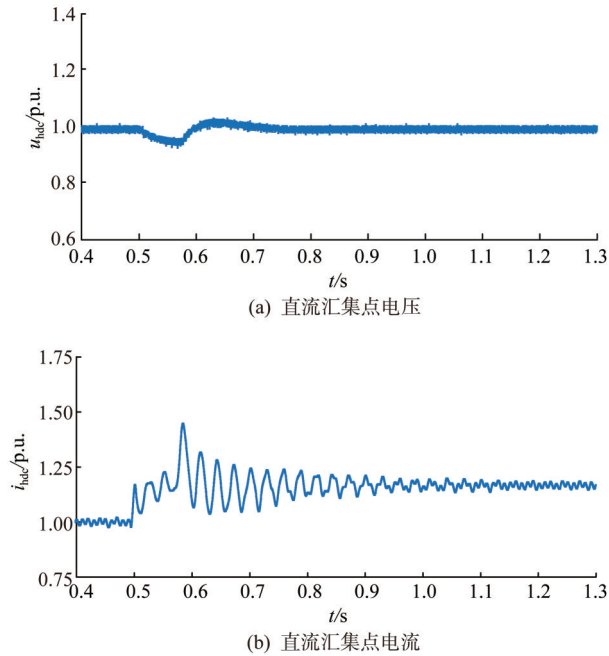


图 12 改变 MMC 等效电容后系统大扰动仿真图

Fig. 12 Simulation of system large perturbation after changing MMC equivalent capacitance

图 6 分析的正确性,下文将通过改变风电场的参数来验证图 7—8 分析的正确性。

为了验证不同 k_{vdp} 设对风电场的影响, 设置 $k_{vdp1}=18$, $k_{vdp2}=16$, $k_{vdp3}=13$, 其他参数保持不变。在 $t=0.5$ s 时将功率从 120 MW 突变到 140 MW, 仿真波形如图 13 所示。

从图 13 中可以看出各风电场的电流和直流母线电压经过波动后重新回到稳定状态, 但每个风电场的波动程度不同, 风电场 1 的波动最小, 风电场 3 的波动最大。可以得出, MSC 的电流环控制参数较大的风电场遭受大扰动后遭受到的电流振荡幅度较小, 增大风电场中 MSC 的电流环控制参数能够降低风电场大扰动后的电流冲击, 进而提升系统稳定性。

设置 $R_{s1}=0.6$, $R_{s2}=0.4$, $R_{s3}=0.2$, 系统中其他参数保持不变。在 $t=0.5$ s 时将功率从 120 MW 突变到 140 MW, 仿真波形如图 14 所示, 从图中可以看出各个风电场的电流和直流母线电压经过波动后重新回到稳定状态, 但是每个风电场电流波动程度不同, 风电场 1 的波动最小, 风电场 3 的波动最大。可以得出, 等效电阻越大的风电场遭受大扰动后遭受到的电流波动较小, 适当增大风电场中的等效电阻能够降低大扰动后的电流冲击, 进而提升系统稳

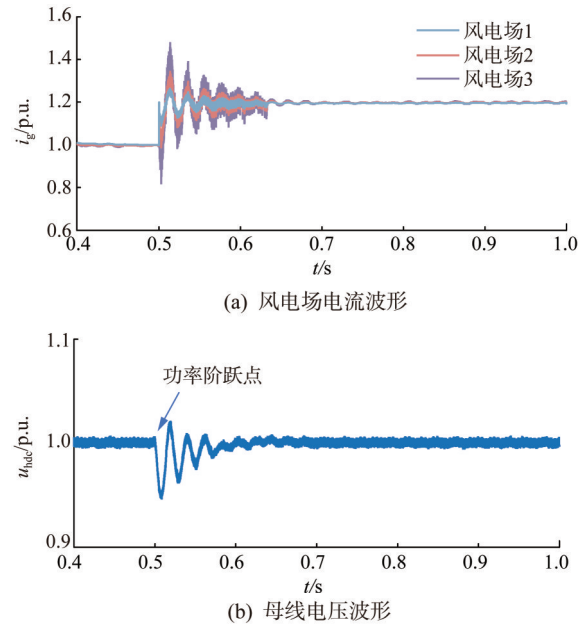


图 13 MSC 电流环控制参数不同各个风电场仿真波形

Fig. 13 Simulated waveforms of each wind farm with different MSC current loop control parameters

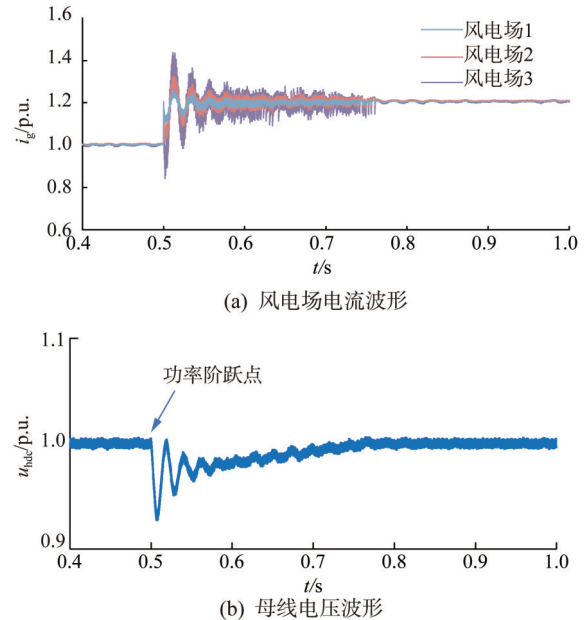


图 14 MSC 等效电感不同各风电场仿真波形

Fig. 14 Simulated waveforms of wind farms with different MSC equivalent inductances

定性。

5 结论

针对多个风电场并联的 OWP-FDCG 系统, 本文提出了基于混合势函数法的大扰动稳定性分析方

法,通过理论分析与仿真验证得到如下结论。

1)混合势函数理论适用于陆上风电全直流发电系统,求解的稳定性判据,较为准确的表达了各参数对系统稳定域的影响。基于该判据可以在设计阶段为系统的参数提供一定的指导。

2)MSC的电流环控制环参数、MSC等效电阻、MSC等效电感、MMC桥臂等效电阻和MMC桥臂等效电感均会影响OWP-FDCG系统的稳定性。增大MMC的等效电容、增大风电场等效电阻等方式能够增强系统的稳定性。

3)功率大扰动对不同参数的风电场影响程度不同。等效电阻较大和MSC电流环控制参数较大的风电场在大扰动的影响下,风电场内电流振荡较小。

4)本文从多个风电场群并联的全直流系统大扰动稳定性机理展开研究,后续可进一步针对提高系统稳定性进行研究。

参考文献

- [1] 刘江山,李凤婷,尹纯亚,等.换相失败引发送端混合级联直流系统换流母线暂态电压波动机理及抑制策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(20):36-46.
LIU Jiangshan, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Mechanism and suppression strategy of transient voltage fluctuation at the converter bus of feeder hybrid cascade DC system triggered by phase change failure[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 36-46.
- [2] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [3] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. DC transmission technology and engineering practice for large-scale new energy friendly transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [4] 田旭,刘飞,张君,等.基于能量同步转换技术的高比例新能源外送地区暂态过电压抑制研究[J].南方电网技术,2022,16(10):95-103.
TIAN Xu, LIU Fei, ZHANG Jun, et al. Research on transient overvoltage suppression in areas with high proportion of new energy transmission based on energy synchronous conversion technology[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 95-103.
- [5] 宋延涛,范雪峰,吴庆范,等.基于MMC的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J].高压电器,2023,59(12):63-74.
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 63-74.
- [6] 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 Zhiguo, XIE Fan, ZHANG Yuning, et al. Status and prospects of relay protection technology for DC lines in distant offshore wind DC collection and transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 1-18.
- [7] 赵彪,安峰,屈鲁,等.多功能直流集电概念及其全直流海上风电系统[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6169-6181.
ZHAO Biao, AN Feng, QU Lu, et al. Multi-function DC-collector concept and its All-DC offshore wind power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6169-6181.
- [8] 孙瑶,樊艳芳,卢俊龙,等.陆上风电直流汇集系统拓扑结构优化设计方法[J].电力系统自动化,2023,47(3):142-152.
SUN Yao, FAN Yanfang, LU Junlong, et al. Optimal design method for topology of onshore wind power DC collection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 142-152.
- [9] 彭穗,余浩,许亮,等.海上风电场输电方式研究[J].电力勘测设计,2021,(11):68-75.
PENG Sui, YU Hao, XU Liang, et al. Research on power transmission scheme for offshore wind farms[J]. Electric Power Survey & Design, 2021, (11): 68-75.
- [10] 王泽昆,程鹏,贾利民.单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析[J].电力系统保护与控制,2024,52(10):118-127.
WANG Zekun, CHENG Peng, JIA Limin. Transient stability analysis of a single-voltage-ring grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 118-127.
- [11] JIN Guixin, LI Fengting, Yin Chunya, et al. Analysis of small-disturbance stability of onshore wind power All-DC power generation system and identification of leading factors[J]. Electronics, 2024(13): 1-8.
- [12] WANG Tao, LI Fengting, Yin Chunya, et al. Small disturbance stability analysis of onshore wind power All-DC power generation system based on impedance method[J]. Energies, 2024(17): 6-20.
- [13] 徐洋,李凤婷,尹纯亚,等.基于Lyapunov法的风电全直流系统大扰动稳定性分析[J/OL].南方电网技术,1-12[2025-05-29].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20250324.0941.008.html>.
- [14] 马文杰,张波,丘东元,等.跟网型并网变换器的稳定域重塑控制策略研究综述[J].电气工程学报,2023,18(2):34-51.
MA Wenjie, ZHANG Bo, QU Dongyuan, et al. Control strategy to reshape the stable region for grid-following converter: an overview[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 34-51.
- [15] 康卓然,张谦,陈民权,等.适用于电力系统暂态稳定分析的网络电压解析算法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49

- (3): 32 – 38.
- KANG Zhuoran, ZHANG Qian, CHEN Minquan, et al. Research on network voltage analysis algorithm suitable for power system transient stability analysis [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 32 – 38.
- [16] 李宇骏, 华凤林, 陆艺源, 等. 基于李雅普诺夫函数的带锁相环的VSC大扰动稳定性判据[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 46 – 54.
- LI Yujun, HUA Fenglin, LU Yiyuan, et al. Large disturbance stability criterion for a VSC with phase-locked loop based on a Lyapunov function [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 46 – 54.
- [17] 厉泽坤, 孔力, 裴玮. 直流微电网大扰动稳定判据及关键因素分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3993 – 4002.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei. Analyses of stability criterion and key factors of DC microgrid under large disturbance [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3993 – 4002.
- [18] 滕昌鹏, 王玉斌, 周博恺, 等. 含恒功率负载的直流微电网大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 973 – 982.
- TENG Changpeng, WANG Yubin, ZHOU Bokai, et al. Large-signal stability analysis of DC microgrid with constant power loads [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 973 – 982.
- [19] 厉泽坤, 孔力, 裴玮, 等. 基于混合势函数的下垂控制直流微电网大扰动稳定性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3725 – 3734.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei, et al. Analysis of large disturbance stability of drooping controlled DC microgrid based on mixed potential function [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3725 – 3734.
- [20] 刘欣博, 高卓. 考虑恒功率负载与储能单元动态特性的直流微电网系统大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 292 – 299.
- LIU Xinbo, GAO Zhuo. Large signal stability analysis of DC microgrid system considering dynamic characteristics of constant power load and energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 292 – 299.
- [21] ZHENG Huajun, ZHOU Luowei, SUN Pengju, et al. Large-Signal stability analysis for VSC-HVDC systems based on mixed potential theory [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1939 – 1948.
- [22] 吴彦伟, 欧嘉俊, 苏涛, 等. 多电压等级直流系统大信号稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(10): 115 – 124.
- WU Yanwei, OU Jiajun, SU Tao, et al. Large-signal stability analysis for DC system with multi-voltage levels [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(10): 115 – 124.
- [23] 阚鹏, 郑华俊, 袁旭峰, 等. 电网电压暂降下配电网SOP系统的大信号稳定性分析及虚拟电容器控制策略[J]. 南方电网技术, 2025, 19(2): 36 – 47.
- KAN Peng, ZHENG Huajun, YUAN Xufeng, et al. Analysis of large signal stability of distribution network SOP system under grid voltage sag and control strategy of virtual capacitor [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 36 – 47.
- [24] 武颖, 徐永海, 王莹鑫, 等. 基于混合势函数法的并网型直流微电网大扰动稳定性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 44 – 55.
- WU Ying, XU Yonghai, WANG Yingxin, et al. Large disturbance stability analysis of grid-connected DC microgrid based on hybrid potential function method [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 52(1): 44 – 55.
- [25] 王泽昆, 程鹏, 贾利民. 单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 118 – 127.
- WANG Zekun, CHENG Peng, JIA Limin. Transient stability analysis of single-voltage ring grid grid-connected inverter [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 118 – 127.
- [26] 李鑫, 孙洋, 杨桢, 等. 基于混合势函数的永磁同步风力发电机暂态稳定性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 168 – 177.
- LI Xin, SUN Yang, YANG Zhen, et al. Transient stability analysis of permanent magnet synchronous wind turbine based on mixed potential function [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 168 – 177.
- [27] 张柏林, 李希德, 魏博, 等. 基于改进的场景分类和去粗粒化MCMC的风电出力模拟方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 41 – 49.
- ZHANG Bolin, LI Xide, Wei Bo, et al. Wind power output simulation method based on improved scene classification algorithm and time series correlation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 41 – 49.

收稿日期: 2024-09-06; 网络首发日期: 2025-05-30

作者简介:

彭岩清(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统稳定性分析, 2631021058@qq.com;

李凤婷(1965), 女, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为交直流混联系统稳定与控制, xjlf2009@sina.com;

尹纯亚(1994), 男, 副教授, 博士, 研究方向为高比例新能源稳定控制, xjdxycy@xju.edu.