

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240187

# 基于广义瞬时能量函数法的大规模直驱风电场并入弱交流电网的短期电压稳定性分析

李东东, 吴祥文, 孙梦显, 赵耀, 罗丁, 钟伟伦, 刘一鸣

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 随着大规模直驱风电场并入弱交流电网, 两者之间复杂的交互作用使得系统遭受扰动后的短期电压稳定问题愈发突出。如何在线准确分析扰动后直驱风电场并网系统的短期电压稳定性是一个关键性挑战。为此提出一种基于广义瞬时能量函数法的短期电压稳定性分析方法。首先, 建立了锁相环  $dq$  坐标系下的直驱风电场并网系统的动态模型。然后, 根据无功守恒原理构造出直驱风电场并网系统的广义瞬时能量函数。基于广义瞬时能量函数提出动态无功能量安全域(dynamic reactive power energy security regions, DRPESR)来在线评估系统的短期电压稳定性。利用构造出的分层能量结构来分析直驱风电场并网系统的短期电压失稳机理。最后, 基于 Matlab/Simulink 的时域仿真结果, 证明了广义瞬时能量函数的有效性和所提判据的准确性。

**关键词:** 直驱风电场; 弱交流电网; 短期电压稳定; 能量函数

## Analysis of short-term voltage stability of a large-scale direct-drive wind farm integrated into a weak AC grid based on the generalized instantaneous energy function method

LI Dongdong, WU Xiangwen, SUN Mengxian, ZHAO Yao, LUO Ding, ZHONG Weilun, LIU Yiming

(College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electrical Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** With the integration of large-scale direct-drive wind farms into weak AC grids, the complex interactions between the two make the short-term voltage stability problem of the system after perturbation more and more prominent. How to accurately analyze the short-term voltage stability of the grid-connected system of direct-drive wind farms after disturbances online is a key challenge. To this end, a short-term voltage stability analysis method based on the generalized instantaneous energy function method is proposed. First, a dynamic model of the grid-connected system of direct-drive wind farms in the phase-locked loop  $dq$  coordinate system is established. Then, the generalized instantaneous energy function of the grid-connected system of direct-drive wind farm is constructed according to the principle of reactive power conservation. Based on the generalized instantaneous energy function, dynamic reactive power energy security regions (DRPESR) are proposed to evaluate the short-term voltage stability of the system online. A hierarchical energy structure is constructed to analyze the short-term voltage destabilization mechanism of the grid-connected system of direct-drive wind farms. Finally, the time-domain simulation results based on Matlab/Simulink demonstrate the validity of the generalized instantaneous energy function and the accuracy of the proposed criterion.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377111).

**Key words:** direct-drive wind farms; weak AC power grid; short-term voltage stability; energy function

## 0 引言

随着我国能源电力绿色低碳转型的深入推进,

传统火力发电机组逐步关停, 交流电网的动态无功电压支撑能力不足, 电网逐渐呈现出弱网的特性<sup>[1-3]</sup>。当大规模直驱风电场接入到弱交流电网, 两者复杂的交互作用使得系统的短期电压稳定问题愈发突出<sup>[4-6]</sup>, 其具体表现为系统在暂态过程中状态

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377111)

轨迹可能会遇到微分代数方程的奇异点<sup>[7]</sup>。如何在线准确分析大规模直驱风电并网系统的短期电压稳定性对保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

短期电压稳定性分析的方法主要包括 P-V 平面稳定边界法<sup>[8]</sup>、人工智能法<sup>[9]</sup>、时域仿真法<sup>[10]</sup>和直接法<sup>[11]</sup>等。文献[8]通过将负荷的工作点与负荷母线的 P-V 平面的稳定边界线进行比较来确定感应电动机的加速或减速状态, 以此解释系统短期电压不稳定现象。文献[12]通过研究随负荷功率增长的网络节点电压幅值、支路电流与无功的变化特征与规律, 构建了以支路响应为信息源的暂态电压失稳判据。但以上方法都是对故障扰动后的系统电压稳定性进行分析判断, 无法提供故障期间系统的稳定裕度。人工智能算法能够充分考虑系统的暂态特性并给出故障期间系统的稳定裕度。文献[13]利用广域时序数据集生成决策树, 进而提出了区域电压稳定判据的方法。文献[14]基于极限学习机建立了自适应分层稳定评估体系。需要注意的是, 该方法缺乏机理解释。虽然人工智能算法可以在线预测短期电压稳定, 但其对离线模拟数据存在较强的依赖性。基于时域仿真的短期电压稳定分析法是一种精确度更高的离线分析方法, 但在系统规模较大时计算系统的状态轨迹效率低且无法给出系统稳定裕度。不同于该方法, 能量函数法仅需通过比较故障切除后系统初始状态的能量与临界能量的大小, 可直接判断系统短期电压稳定性, 计算速度快且能给出稳定裕度<sup>[15]</sup>。基于能量函数法的短期电压稳定性分析的关键是如何构造合适的能量函数。现有文献中对于能量函数的构造方法主要包括变量梯度法<sup>[16]</sup>和基于能量守恒定律的构造方法<sup>[17]</sup>等。文献[18]利用变量梯度法得到的李雅普诺夫能量函数分析了单机无穷大系统的电压稳定性。基于负荷相角变化所获得的不同平衡点下的能量曲线能清晰地反映系统的能量变化和系统中负荷电压。文献[19]提出了一种类势能面法的能量函数来分析短期电压稳定问题。文献[20]将能量函数法和奇异诱导分岔理论相结合, 以此来探究系统轨迹遇到奇异面而产生的瞬时电压不稳定。需要注意的是, 上述文献的能量函数构造方法大多集中在传统电力系统。

为了研究风电并网系统的能量函数构造方法, 文献[21]将风电视作等效负荷, 以其注入电网的功率作为一个端口能量来分析系统暂态稳定性。但该端口能量不能考虑风电系统内部动态变化的影响。除此之外, 该方法计入了风电端口内的耗散能量,

使得暂态稳定分析的结果偏保守。文献[22-23]通过类比传统同步机转子运动方程, 将并网电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的锁相环控制系统等效为二阶振荡模型, 以此构建特定的李雅普诺夫函数, 但该能量函数忽略了 VSC 控制器的动态。文献[24]提出了一种包含详细高压直流动态模型的数值能量函数。结合所提出的数值能量函数和基于启发式方法寻找到的主导不稳定平衡点来确定交直流混合系统的临界稳定时间。考虑到数值能量函数进行积分近似计算时存在累计误差以及启发式方法求取主导不稳定平衡的精度受解的初值影响较大, 该方法求取的临界稳定时间误差较大。为了研究风电系统并入弱电网的短期电压稳定性, 文献[25]讨论了 VSC、电流控制环和电压前馈环节在电流控制时间尺度上对电压动态的重要影响, 即 VSC 电流控制环对端电压提供正阻尼, 而电压前馈环节会产生一个额外的环路, 从而降低了端电压的动态性能和稳定性。尽管上述研究分析了并网变流器控制环节在长时间尺度上的相互作用对短期电压稳定性的影响, 但尚未对系统的短期电压稳定性进行量化评估。

综上, 为了在线准确评估大规模直驱风电场并网系统的短期电压稳定性, 本文提出一种基于广义瞬时能量函数法的短期电压稳定性分析方法。首先, 建立了锁相环  $dq$  坐标系下的直驱风电场并网系统的动态模型。然后, 根据无功守恒原理构造出直驱风电场并网系统的广义瞬时能量函数。基于广义瞬时能量函数提出动态无功能量安全域(dynamic reactive power energy security regions, DRPESR)来在线评估系统的短期电压稳定性。利用构造出的分层能量结构来分析直驱风电场并网系统的短期电压失稳机理。最后, 基于 Matlab/Simulink 的时域仿真结果, 验证了广义瞬时能量函数的有效性和所提判据的准确性。

## 1 直驱风电场并网系统建模

研究大规模风电场并网稳定性问题, 一般将风电场等值为一台风电机组<sup>[26-27]</sup>。风电机组及其控制系统的运行时间尺度为分钟, 短期稳定分析中假定其状态为恒定, 直驱风机的机械动态特性在时间尺度上往往远大于换流器控制环节, 可以不计直驱风机的机械暂态过程<sup>[28]</sup>。在风机出力恒定状态下, 可忽略直驱风电场机侧换流器的动态影响。因此本文关注网侧换流器动态对并网节点母线短期电压稳定性的影响。本文研究的直驱风电场并网系统模型如图 1 所示。系统中相关参数定义如表 1 所示。

为了简化稳定性分析并得出有效的结论, 假设:

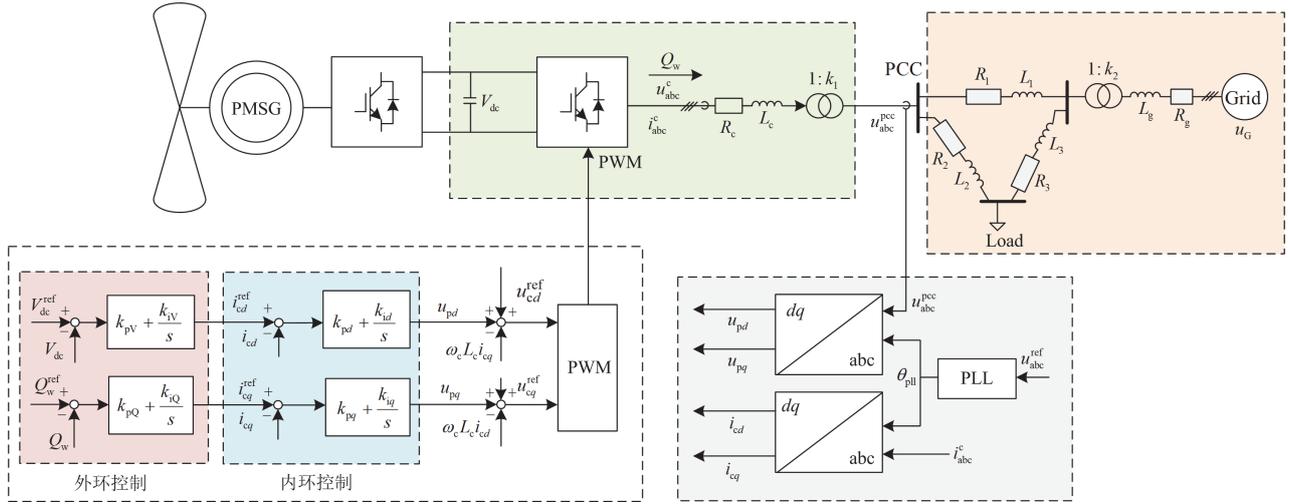


图 1 直驱风电场并入弱交流电网系统结构图

Fig. 1 Diagram of the system structure of a direct-drive wind farm integrated into a weak AC power grid

表 1 系统主要变量

Table 1 Main parameters of the system

变量	含义
$V_{dc}/V_{dc}^{ref}$	直流侧电容电压/参考电压
$u_{abc}^c/i_{abc}^c$	网侧变流器端口输出三相电压/三相电流
$u_{abc}^{PCC}$	并网点 PCC 三相电压
$i_{cd}^{ref}/i_{cd}$	网侧变流器实际输出 $d$ 轴电流/ $d$ 轴参考电流
$i_{cq}^{ref}/i_{cq}$	网侧变流器实际输出 $q$ 轴电流/ $q$ 轴参考电流
$u_{pd}/u_{pq}$	并网点 $d$ 轴电压/ $q$ 轴电压
$u_{cd}^{ref}/u_{cd}$	网侧变流器实际输出 $d$ 轴电压/ $d$ 轴参考电压
$u_{cq}^{ref}/u_{cq}$	网侧变流器实际输出 $q$ 轴电压/ $q$ 轴参考电压
$\theta_{pll}$	网侧变流器锁相环测量相角
$\omega_c$	网侧变流器锁相环测量角速度
$Q_w^{ref}/Q_w$	网侧变流器输出参考无功功率/实际无功功率
$k_{pQ}$ 、 $k_{iQ}/k_{iQ}$ 、 $k_{pQ}$	$q$ 轴功率外环/电流内环 PI 控制参数
$k_{pV}$ 、 $k_{iV}/k_{iV}$ 、 $k_{pV}$	$d$ 轴电压外环/电流内环 PI 控制参数
$R_c/L_c$	网侧 VSC 滤波电阻/电抗
$R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3/$	输电线路电阻/电抗
$L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$	
$R_g/L_g$	同步发电机出口电阻/电抗
PWM	网侧变流器控制输出开关信号

- 故障期间不计风机有功功率变化；
- 忽略电力电子器件开关影响，并网逆变器控制环节输出电压参考值等于电压实际输出值。

### 1.1 同步发电机模型

采用能够考虑转子励磁绕组电磁暂态的同步发电机四阶模型，忽略电阻，其动态方程和暂态电压方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_J} [T_m - T_e - D(\omega - 1)] \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [-E'_q - (x_d - x'_d)i_{gd} + E_{fd}] \\ \dot{E}'_d = \frac{1}{T'_{q0}} [-E'_d + (x_q - x'_q)i_{gq}] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{gd} = i_{gq}x_q \\ u_{gq} = E'_q - i_{gd}x'_d \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\delta$ 为发电机功角； $\omega$ 为电角速度标幺值； $E'_d$ 和 $E'_q$ 分别为 $d$ 轴和 $q$ 轴暂态电动势； $T_J$ 为惯性时间常数； $T_m$ 和 $T_e$ 分别为机械转矩和电磁转矩； $E_{fd}$ 为励磁电动势； $D$ 为阻尼系数； $T'_{d0}$ 和 $T'_{q0}$ 分别为 $d$ 轴和 $q$ 轴开路暂态时间常数； $x_d$ 、 $x_q$ 分别为 $d$ 、 $q$ 轴的电抗； $x'_d$ 、 $x'_q$ 分别为 $d$ 、 $q$ 轴的暂态电抗； $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$ 分别为电枢电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量； $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$ 分别为同步发电机出口母线电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量。

### 1.2 直驱风电场网侧变流器模型

直驱风电场网侧变流器动态方程为

$$\begin{cases} L_c \frac{di_{cd}}{dt} = u_{pd} - u_{cd} - R_c i_{cd} + \omega_c L_c i_{cq} \\ L_c \frac{di_{cq}}{dt} = u_{pq} - u_{cq} - R_c i_{cq} - \omega_c L_c i_{cd} \end{cases} \quad (3)$$

直驱风电场网侧变流器外环控制采用定 $V_{dc}$ - $Q_w$ 控制，其动态方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} u_{cq} = k_{pq}(i_{cq}^{\text{ref}} - i_{cq}) + k_{iq}x_4 + u_{pq} - \omega L_c i_{cd} \\ u_{cd} = k_{pd}(i_{cd}^{\text{ref}} - i_{cd}) + k_{id}x_3 + u_{pd} + \omega L_c i_{cq} \\ i_{cd}^{\text{ref}} = k_{pV}(V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) + k_{iV}x_1 \\ i_{cq}^{\text{ref}} = k_{pQ}(Q_w^{\text{ref}} - Q_w) + k_{iQ}x_2 \\ \frac{dx_1}{dt} = V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc} \\ \frac{dx_2}{dt} = Q_w^{\text{ref}} - Q_w \\ \frac{dx_3}{dt} = i_{cd}^{\text{ref}} - i_{cd} \\ \frac{dx_4}{dt} = i_{cq}^{\text{ref}} - i_{cq} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_1$  和  $x_2$  分别为外环控制中的定直流电压控制环节和定无功功率控制环节的状态量;  $x_3$  和  $x_4$  为内环电流控制的状态量。

## 2 广义瞬时能量函数的构造

### 2.1 基于无功守恒的能量函数构造

对于一个含直驱风电场的  $n$  节点网络, 网络的节点电压和注入电流的关系可以用式(5)来描述。

$$\mathbf{y}\mathbf{u}_{\text{Bus}} - \mathbf{i}_G + \mathbf{i}_L - \mathbf{i}_W = 0 \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{y}$  为系统节点导纳矩阵;  $\mathbf{u}_{\text{Bus}}$  为输电网络节点电压,  $\mathbf{u}_{\text{Bus}} = u_{dk} + \mathbf{j}u_{qk}$ ,  $k=1,2,\dots,n$ ;  $\mathbf{i}_G$  为发电机母线电流;  $\mathbf{i}_W$  为风电场并网点电流;  $\mathbf{i}_L$  为负荷母线电流。

取式(5)等号左边部分的共轭对电压  $\mathbf{u}$  积分, 可得

$$\begin{aligned} W = \int [(\mathbf{y}\mathbf{u}_{\text{Bus}} - \mathbf{i}_G + \mathbf{i}_L - \mathbf{i}_W)^*]^T \mathbf{d}\mathbf{u} = \\ \int (\mathbf{y}\mathbf{u}_{\text{Bus}}^*)^T \mathbf{d}\mathbf{u}_{\text{Bus}} - \int \mathbf{i}_G^* \mathbf{d}\mathbf{u}_G + \\ \int \mathbf{i}_L^* \mathbf{d}\mathbf{u}_L - \int \mathbf{i}_W^* \mathbf{d}\mathbf{u}_W = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{u}_G$  为发电机母线电压,  $\mathbf{u}_G = u_{gd} + \mathbf{j}u_{gq}$ ;  $\mathbf{i}_G$  为发电机母线电流,  $\mathbf{i}_G = i_{gd} + \mathbf{j}i_{gq}$ ;  $\mathbf{u}_L$  为负荷母线电压,  $\mathbf{u}_L = u_{ld} + \mathbf{j}u_{lq}$ ,  $u_{ld}$ 、 $u_{lq}$  分别为负荷母线电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\mathbf{i}_L$  为负荷母线电流,  $\mathbf{i}_L = i_{ld} + \mathbf{j}i_{lq}$ ,  $i_{ld}$ 、 $i_{lq}$  分别为负荷母线电流的  $d$ 、 $q$  轴分量。

当系统稳定时, 式(6)可看作系统能量守恒的表达式, 进一步对式(6)取虚部, 得到

$$\begin{aligned} \text{Im}(W) = \text{Im}[\int (\mathbf{y}\mathbf{u}_{\text{Bus}}^*)^T \mathbf{d}\mathbf{u}_{\text{Bus}} - \int \mathbf{i}_G^* \mathbf{d}\mathbf{u}_G + \\ \int \mathbf{i}_L^* \mathbf{d}\mathbf{u}_L - \int \mathbf{i}_W^* \mathbf{d}\mathbf{u}_W] = W_{\text{Net}} + W_G + W_L + W_W \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} W_{\text{Net}} = \text{Im}[\int (\mathbf{y}\mathbf{u}_{\text{Bus}}^*)^T \mathbf{d}\mathbf{u}_{\text{Bus}}] = \\ \int [-\sum_{i=1}^n B_{ii}(u_{id} \mathbf{d}u_{id} + u_{iq} \mathbf{d}u_{iq}) - \\ \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n B_{ij}(u_{id} \mathbf{d}u_{jd} + u_{iq} \mathbf{d}u_{jq})] \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $u_{id}$ 、 $u_{iq}$  和  $u_{jd}$ 、 $u_{jq}$  分别为网络节点  $i$ 、 $j$  电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $B_{ii}$ 、 $B_{ij}$  为节点导纳矩阵的虚部。

$$\begin{aligned} W_G = \text{Im}(-\int \mathbf{i}_G^* \mathbf{d}\mathbf{u}_G) = \\ \text{Im}[-\int (i_{gd} - \mathbf{j}i_{gq}) \mathbf{d}(u_{gd} + \mathbf{j}u_{gq})] = \\ \int i_{gq} \mathbf{d}u_{gd} - i_{gd} \mathbf{d}u_{gq} \end{aligned} \quad (9)$$

同理,  $W_L$ 、 $W_W$  得到表达式分别如式(10)和式(11)所示。

$$W_L = \int i_{ld} \mathbf{d}u_{lq} - i_{lq} \mathbf{d}u_{ld} \quad (10)$$

$$W_W = \int i_{cq} \mathbf{d}u_{cd} - i_{cd} \mathbf{d}u_{cq} \quad (11)$$

### 2.2 直驱风电场的广义瞬时能量函数

联立式(3)、式(4)、式(11), 直驱风电场的广义瞬时能量函数为

$$\begin{aligned} W_W = \int i_{cq} \mathbf{d}u_{cd} - i_{cd} \mathbf{d}u_{cq} = \\ \int i_{cq} \mathbf{d}[k_{pd}(i_{cd}^{\text{ref}} - i_{cd}) + \\ k_{id} \int (i_{cd}^{\text{ref}} - i_{cd}) \mathbf{d}t + u_{pd} + \omega L_c i_{cq}] - \\ \int i_{cd} \mathbf{d}[k_{pq}(i_{cq}^{\text{ref}} - i_{cq}) + \\ k_{iq} \int (i_{cq}^{\text{ref}} - i_{cq}) \mathbf{d}t + u_{pq} - \omega L_c i_{cd}] \end{aligned} \quad (12)$$

整理得到

$$W_W = W_A + W_B + W_C + W_D \quad (13)$$

其中

$$W_A = k_{pd}k_{pV} \int i_{cq} \mathbf{d}(V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) - k_{pq}k_{pQ} \int i_{cd} \mathbf{d}(Q_w^{\text{ref}} - Q_w) \quad (14)$$

$$W_B = \int (k_{pq}k_{iQ} + k_{iq}k_{pQ})i_{cd}(Q_w^{\text{ref}} - Q_w) \mathbf{d}t - \\ \int (k_{pV}k_{id} + k_{iV}k_{pd})i_{cq}(V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) \mathbf{d}t \quad (15)$$

$$W_C = \int k_{iq}k_{iQ}i_{cd}[\int (Q_w^{\text{ref}} - Q_w) \mathbf{d}t] \mathbf{d}t - \\ \int k_{id}k_{iV}i_{cq}[\int (V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) \mathbf{d}t] \mathbf{d}t \quad (16)$$

$$\begin{aligned} W_D = \int i_{cd} \mathbf{d}u_{pq} - k_{pq} \int i_{cd} \mathbf{d}i_{cq} - \int i_{cq} \mathbf{d}u_{pd} - k_{pd} \int i_{cq} \mathbf{d}i_{cd} - \\ \int \omega L_c (i_{cq} \mathbf{d}i_{cq} + i_{cd} \mathbf{d}i_{cd}) + \int L_c (i_{cq}^2 - i_{cd}^2) \mathbf{d}\omega \end{aligned} \quad (17)$$

本文所构造的直驱风电场的广义瞬时能量函数分为 4 个部分, 即外环控制和电流内环控制环节

的比例增益部分相关的能量  $W_A$ ，外环控制和电流内环控制的积分环节相关的能量  $W_B$  和  $W_C$ ，以及系统频率变化相关的能量  $W_D$ 。

### 2.3 交流电网的广义瞬时能量函数

同理，联立式(1)一式(10)，推导得到同步发电机、输电网络以及负荷的能量函数，如式(18)一式(20)所示。

$$W_G = \int \frac{i_{gd}}{T'_{d0}} (E_{fd} - u_{gq} - x_d i_{gd}) dt - \int (x'_d i'_{gd} di_{gd} + x_q i_{gq} di_{gq}) \quad (18)$$

$$W_{Net} = \int [-\sum_{i=1}^n B_{ii} (u_{id} du_{id} + u_{iq} du_{iq}) - \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n B_{ij} (u_{id} du_{jd} + u_{iq} du_{jq})] \quad (19)$$

$$W_L = \int i_{ld} du_{lq} - i_{lq} du_{ld} \quad (20)$$

### 2.4 直驱风电场并网系统的广义瞬时能量函数

直驱风电场并网系统的广义瞬时能量函数  $W_S$  可被定义为

$$W_S = W_G + W_W + W_L + W_{Net} \quad (21)$$

系统的能量函数需要满足以下 3 个条件：1) 能量函数沿任何轨迹的导数都是非正的；2) 若状态轨迹  $x(t)$  非平凡，则沿该轨迹，集合  $\{t \in \mathbb{R}; \dot{W}(x(t)) = 0\}$  在  $\mathbb{R}$  中具有零测度；3) 能量函数  $W[x(t)]$  有界，则  $x(t)$  有界。根据文献[21]可证明本文所构造的广义瞬时能量函数是系统的能量函数。

## 3 短期电压稳定性分析

### 3.1 动态无功能量安全域

传统的能量函数法是根据系统故障持续过程中达到势能最大值或者结合主导不稳定平衡点来求取临界能量，进而评估系统的暂态稳定性<sup>[29]</sup>。然而势能边界法一般被用来分析系统的同步稳定性，而主导不稳定点的求取较复杂且结果误差较大。对此，本文基于直驱风电场的广义能量函数提出新的短期电压稳定指标。

大规模直驱风电场并网会导致电力系统的失稳模式由同步机主导的角功失稳变为风电主导的电压失稳<sup>[4-7]</sup>。由式(14)一式(17)可知，直驱风电场的瞬时能量函数能够反映其在暂态期间多时间尺度的能量变化。并网换流器控制环节中比例环节能够产生调节作用以减少偏差，积分环节能够消除系统稳态误差<sup>[30]</sup>。结合李雅普诺夫第一定理，可以根据直驱风电场 4 个部分的瞬时能量函数在故障期间的变化

来提出新的稳定判据。

如图 2 所示，当  $W_A < 0$  时，比例增益环节能够减小被控制量的误差，而当  $W_A \geq 0$  时，比例增益环节反而会增加被控制量的误差。同理，当  $W_B$  和  $W_C$  都小于 0 时，积分环节能消除系统暂态误差，当两者均大于 0 时，积分环节会增大系统暂态误差。相对于控制环节，从为系统提供正向调节效应变为提供负向调节效应，系统无功功率不能被平衡，系统失稳。

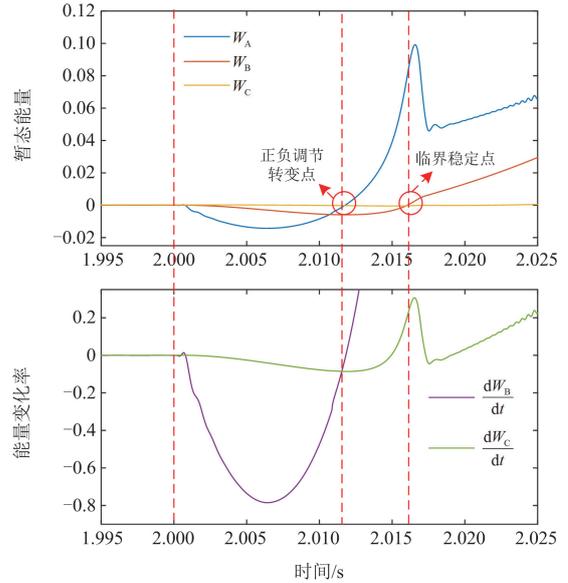


图 2 正负调节效应转换点和临界稳定点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the transition point and critical stabilization point for positive and negative moderating effects

在系统持续故障期间，VSC 控制系统分为两个阶段，第一阶段提供正调节效应，此时  $W_A < 0$ ，控制系统有足够的裕度能够将状态量调整回稳定区域，当  $W_A = 0$  时，为正负调节效应转换点，此时  $dW_B / dt = 0$ ，即外环控制比例增益环节达到了正负调节效应的临界值。第二阶段提供负调节效应，当  $W_A > 0$  时，负调节效应的比例控制环节会减少系统的稳定裕度，此时  $W_B$  的导数为正，系统趋向于失稳；而当  $W_B = 0$  时，系统稳定裕度为 0；当  $W_B > 0$  时，此时 VSC 控制系统不再提供正的调节效应，此时切除故障，系统将失去稳定。由于故障持续时间较短，且内环控制速度远快于外环控制速度， $W_C$  中二次积分项约等于 0，故障期间的  $W_W$  的稳定裕度可以主要根据  $W_B$  的变化来判断。并且当控制系统稳定时，内环控制的稳定裕度应大于外环控制稳定裕度，即积分控制环节稳定时有  $W_B < W_C$ 。

基于以上研究, 本文提出一种用于分析直驱风电场并网系统短期电压稳定性的动态无功能量安全域(dynamic reactive power energy security regions, DRPESR), 其表示形式如式(22)所示。

$$Z_{\text{DRPESR}} = \begin{cases} \text{稳定, } \{t > t_{\text{cl}}, W_B < 0 \& W_B < W_C\} \\ \text{不稳定, } \{t > t_{\text{cl}}, W_B \geq 0 | W_B \geq W_C\} \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $t_{\text{cl}}$  为故障清除时刻。

### 3.2 直驱风电场并网 VSC 的无功能量结构

任何物理系统都可通过能量守恒的方式彼此互联形成, 这样的结构可以清晰地体现出能量的流动特性<sup>[31]</sup>。文献[32]给出了一般电力系统的能量狄拉克结构, 但没有构造出电力电子设备的能量结构。为了解释本文所提动态无功能量安全域指标的物理意义, 本文构建了如图3所示的网侧 VSC 能量结构图。

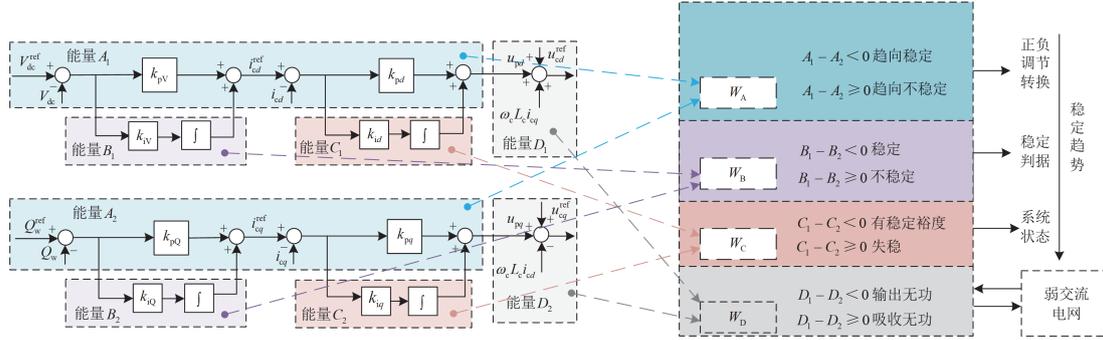


图3 直驱风电场并网 VSC 无功能量结构

Fig. 3 Grid-connected VSC reactive power structure of direct-drive wind farm

由式(14)一式(17)可知, 将外环控制和电流内环控制的比例、积分环节分成4组, 每组与能量  $W_A$ 、 $W_B$ 、 $W_C$  和  $W_D$  相对应。

对于能量  $W_A$ , 当能量  $W_A = A_1 - A_2 < 0$  时,  $d$  轴提供无功能量小于  $q$  轴无功能量, 此时比例控制环节提供正向调节效应, 系统趋向于稳定; 当  $W_A = A_1 - A_2 \geq 0$  时, 比例控制环节提供负向调节效应, 系统趋向于失稳。此时, 可根据积分环节的状态判断系统稳定性。

对于能量  $W_B$ , 当  $W_B = B_1 - B_2 < 0$  时, 外环控制的积分环节能提供正的调节效应, 此时切除故障, 积分环节能够消除比例控制环节的误差, 使系统恢复稳定状态; 当  $W_B = B_1 - B_2 \geq 0$  时, 外环控制的积分环节无法正向调节状态误差, 此时切除故障系统将失去稳定。

对于能量  $W_C$ , 当  $W_C = C_1 - C_2 < 0$  时, 说明控制环节未完全失稳, 此时系统是存在一定稳定裕度的。当  $W_C = C_1 - C_2 \geq 0$  时, 外环控制和内环控制都是负向调节系统误差, 此时系统处于失稳状态。实际上, 由于电流内环控制速度快于外环控制速度, 能量  $W_C$  在持续故障期间约等于 0。

能量  $W_D$  是 VSC 通过出口阻抗和交流电网交互的能量部分, 当  $W_D = D_1 - D_2 < 0$  时, VSC 向系统输出无功, 在故障初期, 系统缺额大量无功时, 能够提供一定的无功支撑, 但是当  $W_D = D_1 - D_2 \geq 0$

时, VSC 向系统吸收无功, 此时 VSC 趋向于失稳。

因此, 本文所构造的无功能量结构能够通过暂态期间能量  $W_A$ 、 $W_B$ 、 $W_C$  和  $W_D$  的变化来分析系统的稳定性, 并以此解释直驱风电场主导的电压失稳机理。

### 3.3 不同控制方式下的动态无功能量安全域

为了研究本文理论分析方法在网侧变流器采用不同控制方式下的适用性, 将  $q$  轴外环控制采用定无功功率控制改为定交流电压控制, 则直驱风电场的广义瞬时能量函数变为

$$W_A = k_{pd}k_{pv} \int i_{cq} d(V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) - k_{pq}k_{pq} \int i_{cd} d(V_s^{\text{ref}} - V_s) \quad (23)$$

$$W_B = \int (k_{pq}k_{iq} + k_{iq}k_{pq}) i_{cd} (V_s^{\text{ref}} - V_s) dt - \int (k_{pv}k_{id} + k_{iv}k_{pd}) i_{cq} (V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) dt \quad (24)$$

$$W_C = \int k_{iq}k_{iq} i_{cd} [\int (V_s^{\text{ref}} - V_s) dt] dt - \int k_{id}k_{iv} i_{cq} [\int (V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) dt] dt \quad (25)$$

$$W_D = \int i_{cd} du_{pq} - k_{pq} \int i_{cd} di_{cq} - \int i_{cq} du_{pd} - k_{pd} \int i_{cq} di_{cd} - \int \omega L_c (i_{cq} di_{cq} + i_{cd} di_{cd}) + \int L_c (i_{cq}^2 - i_{cd}^2) d\omega \quad (26)$$

式中:  $V_s^{\text{ref}}$  为并网点 PCC 交流电压参考值;  $V_s$  为并网点 PCC 交流电压。

如图4所示, 本文在定无功功率控制方式下提出的并网变流器无功能量结构理论, 依旧可以用在

定交流电压控制方式下的直驱风电场短期电压稳定性分析上。由图 4 可知，在定交流电压控制下，当系统发生三相短路接地故障时，故障期间网侧变流器需要向交流电网吸收无功功率，网侧变流器相当于“无功负荷”，此时  $W_D > 0$ ，与第 3.2 节中所提出的理论一致。故障期间交流系统需要向直驱风电场并网变流器提供无功功率，如果交流系统是弱系统，无法提供足够的无功支撑，则持续故障期间，系统会存在一个无功能量支撑极限值，当变流器吸收无功能量达到这个极限值，系统处于临界状态。如果在极限值之前切除故障，系统不会失去稳定，反之，系统会失去稳定。由于当能量  $W_D$  超过临界值后，故障持续期间并网变流器的暂态能量  $W_A$ 、 $W_B$ 、 $W_C$  都小于 0，根据第 3.2 节提出的理论，故障切除后并网变流器控制系统不会立即失稳，而是当弱交流系统中的同步机失稳后才会进一步导致并网变流器失稳。

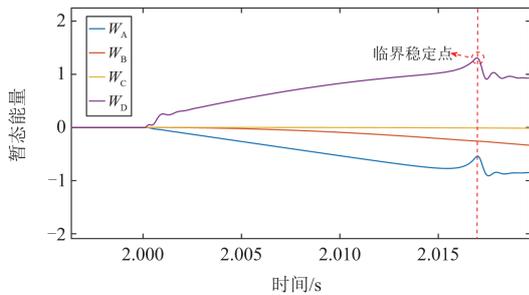


图 4 临界稳定点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the critical stability point

基于以上研究，进一步提出网侧变流器在定直流电压-定交流电压控制下的动态无功能量安全域 2 (dynamic reactive power energy security region 2, DRPESR2)，即持续故障期间能量  $W_D$  轨迹的最大值如果小于临界稳定点的能量大小，则故障切除后系统能够恢复稳定，反之则会失去稳定，指标表达式为

$$Z_{DRPESR2} = \begin{cases} \text{稳定, } \{t < t_{cl}, \max[W_D(t)] < W_{cr}\} \\ \text{不稳定, } \{t < t_{cl}, \max[W_D(t)] \geq W_{cr}\} \end{cases} \quad (27)$$

式中， $W_{cr}$  为能量  $W_D$  在临界稳定点时的能量大小。

### 3.4 考虑低电压穿越及撬棒保护的动态无功能量安全域

风电机组主要依靠硬件保护和换流器控制策略实现低电压穿越功能<sup>[33-35]</sup>。为进一步考虑低电压穿越及撬棒保护来评估研究结果的通用性，参考文献[36-37]，在所构建的直驱风电场并网系统的直流侧加入如图 5 所示的耗能 Crowbar 电路。图 5 中： $V_{dc}$  为直流电压的测量值； $R$  为耗能电阻。

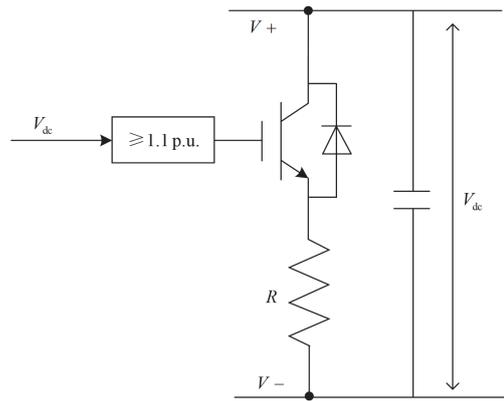


图 5 耗能 Crowbar 电路控制框图

Fig. 5 Block diagram of the energy-dissipating Crowbar circuit

如图 6 所示，在第 3.2 节中提出的并网变流器无功能量结构理论，依旧可以用在加入撬棒保护后的直驱风电场并网系统的短期电压稳定性分析上。当直驱风电场没有考虑低电压穿越及撬棒保护时，暂态稳定性较弱，进行电压稳定分析时间尺度较短。由于电流内环控制环节速度远快于外环控制时间尺度，持续故障期间在该时间尺度内能量  $W_C$  变化近似为 0。当系统中加入撬棒保护环节，并网变流器暂态稳定性得到一定的提高，进行电压稳定分析的时间尺度变长，此时电流内环控制引起的无功能量  $W_C$  变化将不能被忽略。根据第 3.2 节所提出的理论，当能量  $W_C > 0$  时，并网变流器会失去稳定，由于有直流侧撬棒保护电路提供一定的稳定支撑，此时切除故障，系统并不会失去稳定。直到当  $W_C > W_A$  时，即电流内环控制积分环节的能量大于增益环节的能量时，表明控制系统的 PI 控制环节已经彻底失稳，此时切除故障，并网变流器会彻底失去稳定。

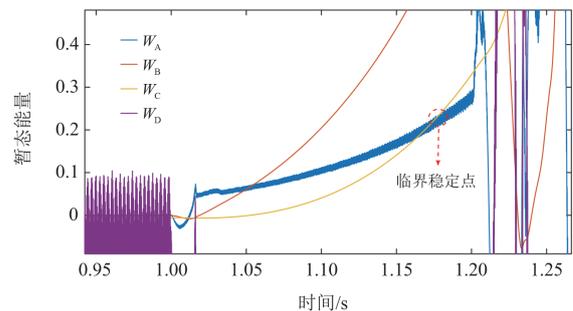


图 6 临界稳定点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the critical stability point

基于以上研究，针对加入了典型撬棒保护环节的直驱风电场并网系统，提出新的动态无功能量安全域指标 3 (dynamic reactive power energy security

region 3, DRPESR3), 具体表达式如式(28)所示。

$$Z_{\text{DRPESR3}} = \begin{cases} \text{稳定, } \{t > t_{\text{cl}}, W_C < W_A \text{ or } W_C < 0\} \\ \text{不稳定, } \{t > t_{\text{cl}}, W_C \geq W_A > 0\} \end{cases} \quad (28)$$

#### 4 仿真算例

基于图 1 所示的直驱风电场并入弱交流系统结构, 在 Matlab/Simulink 中搭建对应的电磁暂态仿真模型, 来验证广义瞬时能量函数和 DRPESR 判据的有效性。本文仿真系统的额定短路比为 2.5, 为验证所构造的广义瞬时能量函数的有效性, 本文设置以下两个场景。

1) 改变故障位置, 分别在风机并网侧、同步发电机并网侧和负荷侧设置三相接地短路故障。

2) 改变风机出力, 从而改变系统强度。风机出力占比越大, 短路比越小, 系统越容易失稳。

##### 4.1 系统广义瞬时能量函数有效性验证

在输电线路设置三相短路接地故障, 采用梯形积分路径近似来计算稳定情况下和不稳定情况下系统的广义瞬时能量函数变化。

由图 7 可知, 系统的能量函数在第 2 s 前为 0, 表明系统此时处于稳定状态。在第 2 s 时发生三相短路接地故障, 故障期间系统能量函数快速增大, 此时电源持续提供无功能量。当故障切除后, 系统中各部分的能量函数最终都趋于 0, 表明系统暂态期间的能量能够被耗散掉, 系统能够恢复稳定状态。

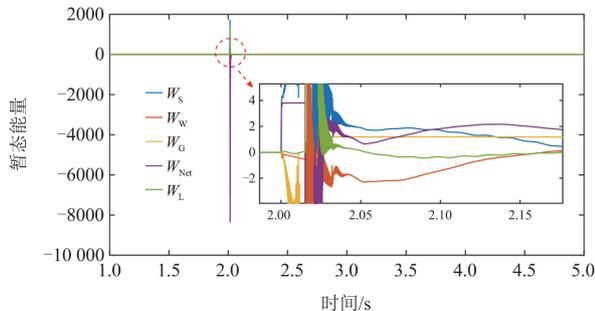


图 7 大扰动后系统恢复稳定的暂态能量变化

Fig. 7 Transient energy changes for restoring stability to a system after a large disturbance

由图 8 可知, 在第 2 s 时发生三相接地短路故障, 一段时间后故障切除, 系统的能量函数发散, 系统中各部分的能量函数在故障切除后不能恢复到稳定值, 表明系统失去稳定, 故验证了本文所构造出的广义瞬时能量函数在系统扰动后失去稳定情况下的有效性。除此之外, 由图 8 中暂态能量变化规律可知, 系统扰动失稳后暂态无功能量的主要部分是直驱风电场的能量, 表明暂态期间由直驱风电场

主导的无功能量变化影响较大, 因此可以针对直驱风电场的能量变化研究其系统的短期电压稳定性。

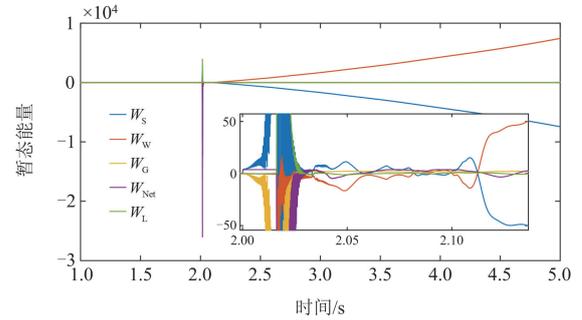


图 8 大扰动后系统失去稳定的暂态能量变化

Fig. 8 Transient energy change of a system destabilized after a large disturbance

##### 4.2 直驱风电场广义瞬时能量函数有效性验证

如图 9 所示, 在故障切除后直驱风电场的各部分能量函数最终趋于稳定, 表明系统能够恢复稳定, 且暂态能量  $W_A$ 、 $W_B$ 、 $W_C$  与  $W_D$  的和为 0, 说明系统暂态能量能够耗散掉。

如图 10 所示, 在发生大扰动后系统失去稳定, 直驱风电场各部分能量最终发散, 其中  $W_B$  和  $W_C$  发散速度最快, 表明控制系统积分环节对直驱风电场

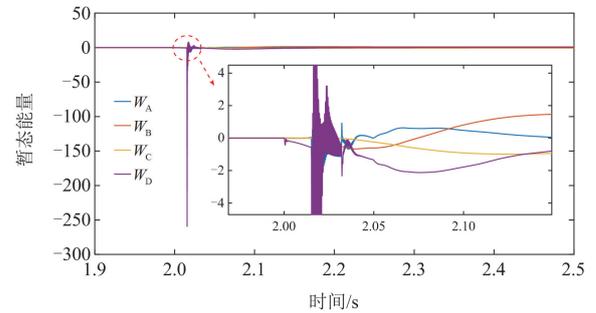


图 9 大扰动切除后系统恢复稳定的直驱风电场能量变化

Fig. 9 Energy changes in direct-drive wind farms where the system is restored to stability after large disturbance removal

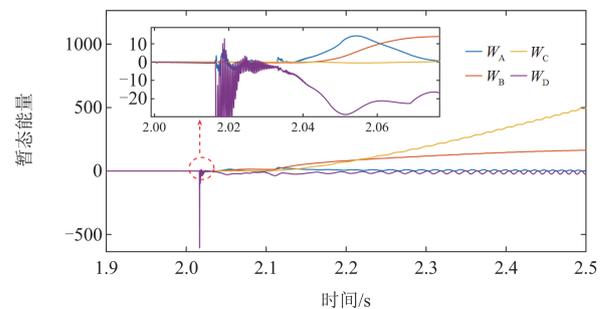


图 10 大扰动切除后系统失去稳定的直驱风电场能量变化

Fig. 10 Energy changes in direct-drive wind farms where the system is destabilized after large disturbance removal

并网系统的稳定性影响较大。

### 4.3 动态无功能量安全域指标有效性验证

#### 1) DRPESR 指标有效性验证

为验证所提 DRPESR 指标的有效性, 如图 11 所示, 在  $t = 2\text{ s}$  时切除故障, 故障持续时间为  $0.02\text{ s}$ , 系统发生电压失稳。根据能量变化曲线图找到  $W_B = W_C$  的临界点, 得到临界切除时间(critical clearing time, CCT)。由图 11 可知, DRPESR 指标求得的 CCT 为  $2.0159\text{ s}$ , 再利用时域仿真法验证所求得 CCT 的准确性。

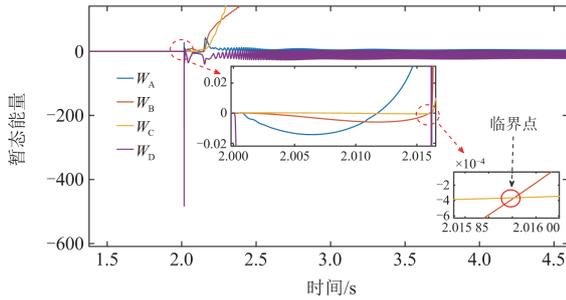


图 11 故障持续时间为  $0.002\text{ s}$  时 VSC 能量变化曲线  
Fig. 11 VSC energy curve when the fault duration is  $0.002\text{ s}$

由图 12 可知, 在  $2.0158\text{ s}$  时切除故障, 系统能量轨迹未到达临界点, 证明在临界点的左边时间范围内切除故障系统能恢复稳定。

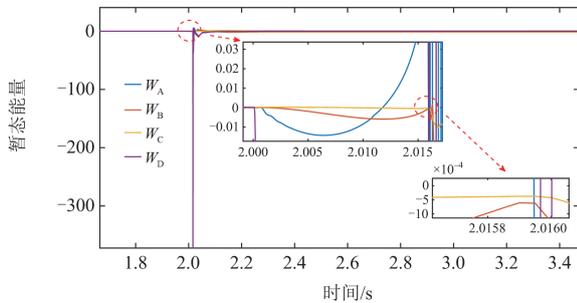


图 12 故障持续时间为  $0.0158\text{ s}$  时 VSC 能量变化曲线  
Fig. 12 VSC energy curve when the fault duration is  $0.0158\text{ s}$

由图 13 可知, 在  $2.0160\text{ s}$  时切除故障, 系统能量轨迹超过临界点, 证明在临界点的右边范围内切除故障, 系统会失去稳定。因此, DRPESR 指标能够有效地预测直驱风电场网侧变流器在定直流电压-一定无功功率控制方式下的短期电压稳定性。

#### 2) DRPESR2 指标有效性验证

如图 14 所示, 在系统稳定运行第  $2\text{ s}$  时设置三相接地短路故障, 故障持续时间为  $0.02\text{ s}$ , 系统失去稳定。根据能量变化曲线寻找  $W_D$  的最大值点, 进而得到 CCT。由图 14 可知, DRPESR2 指标求得

的 CCT 为  $2.0170\text{ s}$ , 再利用时域仿真法验证所求得 CCT 的准确性。

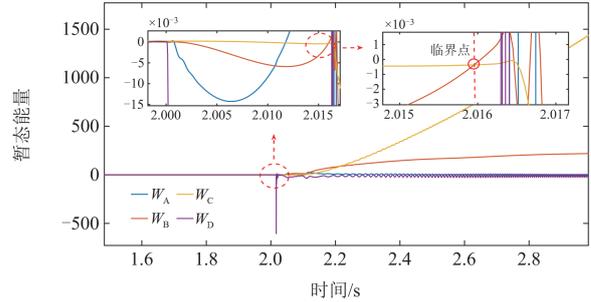


图 13 故障持续时间为  $0.0160\text{ s}$  时 VSC 能量变化曲线  
Fig. 13 VSC energy curve when the fault duration is  $0.0160\text{ s}$

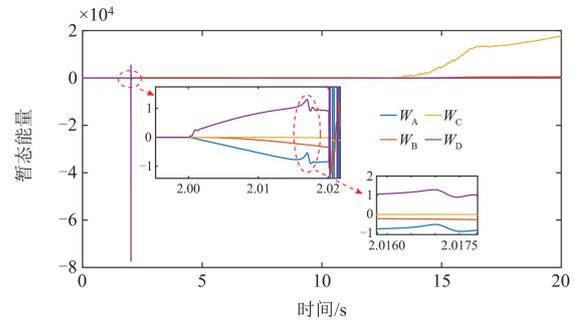


图 14 故障持续时间为  $0.02\text{ s}$  时 VSC 能量变化曲线  
Fig. 14 VSC energy curve when the fault duration is  $0.02\text{ s}$

由图 15 可知, 在  $2.0169\text{ s}$  时切除故障, 系统能量轨迹未到达临界点, 故障切除后系统能够恢复稳定, 证明在临界点的左边范围内切除故障系统都能够恢复到稳定状态。

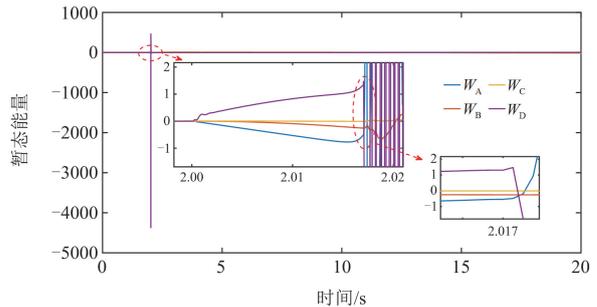


图 15 故障持续时间为  $0.0169\text{ s}$  时 VSC 能量变化曲线  
Fig. 15 VSC energy curve when the fault duration is  $0.0169\text{ s}$

由图 16 可知, 在  $2.0173\text{ s}$  时切除故障, 系统能量轨迹超过临界点, 故障切除后最终系统失去稳定, 证明在临界点的右边范围内切除故障系统失去稳定。因此, DRPESR2 指标能够有效地预测直驱风电场网侧变流器在定直流电压-一定交流电压控制方式下的短期电压稳定性。

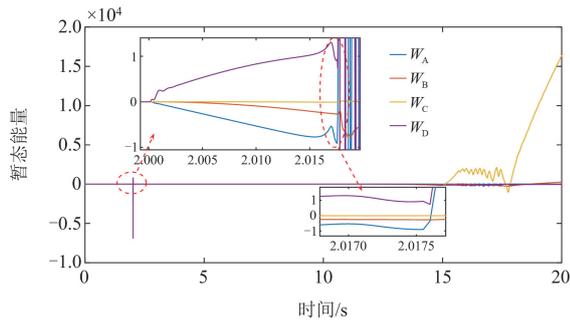


图 16 故障持续时间为 0.0173 s 时 VSC 能量变化曲线

Fig. 16 VSC energy curve when the fault duration is 0.0173 s

## 3) DRPESR3 指标有效性验证

为验证所提出的 DRPESR3 指标的有效性, 在系统稳定运行第 2 s 时设置三相短路接地故障, 故障持续时间为 0.2 s, 系统发生电压失稳。根据能量变化曲线图寻找  $W_C = W_A$  的临界点, 得到临界切除时间 CCT。由图 17 可知, DRPESR3 指标求得的 CCT 为 2.180 s, 再利用时域仿真法验证所求得 CCT 的准确性。

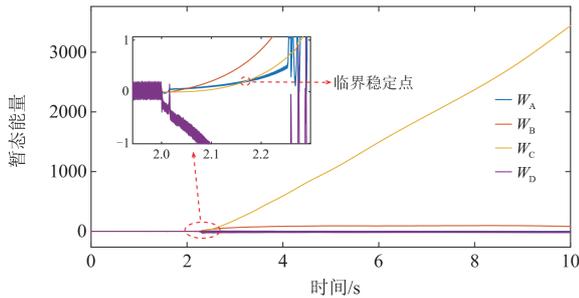


图 17 故障持续时间为 0.2 s 时 VSC 能量变化曲线

Fig. 17 VSC energy curve when the fault duration is 0.2 s

由图 18 可知, 在 2.175 s 时切除故障, 系统能量轨迹未到达临界点, 故障切除后系统能够恢复稳定, 证明在临界点的左边范围内切除故障系统都能恢复稳定。由图 19 可知, 在 2.191 s 时切除故障, 持续故障期间系统能量轨迹超过临界点, 在故障切除后系统不能恢复稳定, 能量 B 和能量 C 发散, 证

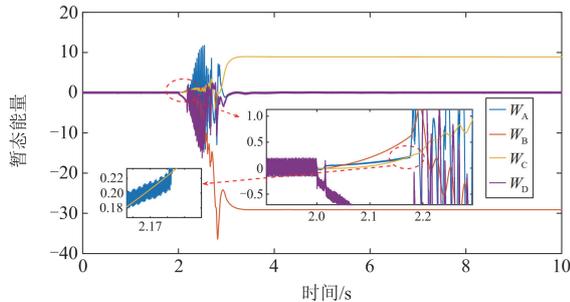


图 18 故障持续时间为 0.175 s 时 VSC 能量变化曲线

Fig. 18 VSC energy curve when the fault duration is 0.175 s

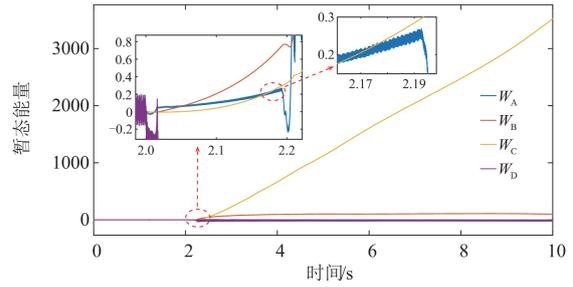


图 19 故障持续时间为 0.0191 s 时 VSC 能量变化曲线

Fig. 19 VSC energy curve when the fault duration is 0.0191 s

明在临界点的右边范围内切除故障系统会失去稳定。因此, DRPESR3 指标能够有效地预测直驱风电场网侧变流器在直流侧加入耗能 Crowbar 电路后的短期电压稳定性。

综上, 本文所提出的动态无功能量安全域指标 DRPESR、DRPESR2 和 DRPESR3, 在对应的控制方式下都能够有效地预测直驱风电场并入弱交流电网系统的短期电压稳定性, 对未来新能源大规模并网的新型电力系统短期电压稳定性分析具有重要意义。

## 4.4 短期电压稳定指标有效性进一步验证

为使得预测结果更具有说服力, 在详细模型下进行时域仿真, 进一步验证所提短期电压稳定指标的有效性。设置 2 个不同的场景, 直驱风电场的出力从 30 MW 增加到 40 MW, 直驱风电场并网系统从短路比为 3.3 的强系统变为短路比为 2.5 的弱系统。在不同位置设置三相短路接地故障, 分别计算由 DRPESR、DRPESR2 以及 DRPESR3 指标所求得的临界切除时间, 与时域仿真法获得的实际 CCT 进行比较, 详细仿真结果见表 2、表 3 和表 4。

由表 2 可知, 当直驱风电场网侧变流器外环控制采用定直流电压-定无功功率控制方式, DRPESR 指标与时域仿真结果误差较小, 在不同的故障位置、系统强度下都能够得到准确性较高的 CCT, 证明了方法的有效性。

表 2 DRPESR 验证仿真结果

Table 2 DRPESR verification simulation result

场景	PMSG 输出功率/MW	短路比	故障位置	CCT/s		相对误差/%
				DRPESR	时域仿真	
1	30	3.3	SG 侧	0.0172	0.0170	1.2
			PMSG 侧	0.0189	0.0194	-2.6
			负荷侧	0.0172	0.0171	0.6
2	40	2.5	SG 侧	0.0158	0.0160	-1.2
			PMSG 侧	0.0175	0.0178	-1.7
			负荷侧	0.0180	0.0177	1.7

由表 3 可知, 当直驱风电场网侧变流器外环控制采用定直流电压-定交流电压控制方式, 本文所提出的 DRPESR2 指标能够较为准确地预测临界切除时间, 证明本文所提出的广义瞬时能量函数方法具有较好的适应性。

由表 4 可知, 当直驱风电场为提供一定的低压穿越能力在直流侧加入耗能 Crowbar 电路后, 其暂态特性发生改变, 本文所提出的 DRPESR3 指标依旧能够较为准确地预测系统的 CCT。证明本文所提广义瞬时能量函数能够有效地分析含有低压穿越及撬棒保护的直驱风电场并网系统的短期电压稳定性。

表 3 DRPESR2 验证仿真结果

Table 3 DRPESR2 verification simulation results

场 景	PMSG 输出 功率/MW	短路 比	故障 位置	CCT/s		相对 误差/%
				DRPESR2	时域仿真	
1	30	3.3	SG 侧	0.0174	0.0169	-2.31
			PMSG 侧	0.0203	0.0192	-5.42
			负荷侧	0.0179	0.0175	-1.69
2	40	2.5	SG 侧	0.0173	0.0169	-2.31
			PMSG 侧	0.0203	0.0190	-6.40
			负荷侧	0.0178	0.0175	-1.69

表 4 DRPESR3 验证仿真结果

Table 4 DRPESR3 verification simulation results

场 景	PMSG 输出 功率/MW	短路 比	故障 位置	CCT/s		相对 误差/%
				DRPESR3	时域仿真	
1	30	3.3	SG 侧	0.189	0.183	-3.17
			PMSG 侧	0.190	0.185	-2.63
			负荷侧	0.608	0.625	7.75
2	40	2.5	SG 侧	0.190	0.175	-7.89
			PMSG 侧	0.190	0.175	-7.89
			负荷侧	0.200	0.185	-7.75

## 5 结论

本文提出一种基于无功守恒的直驱风电场并入弱交流系统的短期电压稳定性分析方法。该方法首先建立了锁相环  $dq$  坐标系下的直驱风电场并网系统的动态模型。基于能量守恒定律, 利用首次积分法, 分别推导出直驱风电场、同步机、输电网络和负荷的广义瞬时能量函数。然后, 基于直驱风电场的广义瞬时能量函数提出动态无功能量安全域来在线评估系统的短期电压稳定性。通过构造网侧变流器的分层能量结构, 来分析直驱风电场并网系统的短期电压失稳机理。为了进一步评估本文所提方法的适应性和通用性, 还考虑了外环控制采用不同控制方式以及直流侧考虑低电压穿越及撬棒保护, 并

提出对应的动态无功能量安全域指标 DRPESR2 和 DRPESR3。最后通过仿真验证了所提短期电压稳定指标的有效性, 证明其能够在线准确评估大规模直驱风电场并入弱交流系统的短期电压稳定性。

除此之外, 本文提出的广义瞬时能量函数构造方法以及动态无功能量安全域指标, 未来能够进一步扩展到多机多节点直驱风电场并网系统的短期电压稳定性研究。为未来分析高比例电力电子设备并网之后的新型电力系统的短期电压稳定性提供了一定的理论基础。

## 参考文献

[1] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.  
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 36(6): 1593-1604, 1895.

[2] 吴亚宁, 罗毅, 雷成, 等. 基于改进型 PEM 和 L 指标的含风电场电力系统静态电压稳定评估[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 192-203.  
WU Yaning, LUO Yi, LEI Cheng, et al. Steady-state voltage stability evaluation of power system containing wind farm based on improved PEM and L index[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 192-203.

[3] 董文凯, 任必兴, 王海风, 等. 适用于系统次同步振荡分析的风电场等值建模方法综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 33-43.  
DONG Wenkai, REN Bixing, WANG Haifeng, et al. Small-signal equivalent modeling methods of the wind farm and its application in sub-synchronous oscillations analysis of grid-connected wind power systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 33-43.

[4] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-515.  
YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-515.

[5] 徐艳春, 蒋伟俊, 孙思涵, 等. 含高渗透率风电的配电网暂态电压量化评估方法[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 152-162.  
XU Yanchun, JIANG Weijun, SUN Sihan, et al. Quantitative assessment method for transient voltage of distribution network with high-penetration wind power[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 152-162.

- [6] 涂思嘉, 杨悦荣, 林舜江, 等. 考虑风电不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 94-104.  
TU Sijia, YANG Yuerong, LIN Shunjiang, et al. An optimal control method for static voltage stability of AC/DC hybrid power grid considering the uncertainty of wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 94-104.
- [7] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.  
CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15-21.
- [8] KAWABE K, TANAKA K. Analytical method for short-term voltage stability using the stability boundary in the P-V plane[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3041-3047.
- [9] 郭培, 陈波, 高云超, 等. 基于 XGBOOST-PSO 提高受端电网电压暂态稳定的发电机无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 148-158.  
GUO Pei, CHEN Bo, GAO Yunchao, et al. A generator reactive power optimization method based on XGBOOST-PSO to improve the voltage transient stability of a receiving terminal network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 148-158.
- [10] NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Theory and analysis of dynamic power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [11] 万秋兰, 单渊达. 对应用直接法分析电力系统暂态稳定性的再认识[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 13-15.  
WAN Qiulan, SHAN Yuanda. Re-understanding of the direct methods for power system transient stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 13-15.
- [12] 郑超, 孙华东, 杨大业. 基于广域支路响应的暂态电压失稳判据与控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9470-9481.  
ZHENG Chao, SUN Huadong, YANG Daye. Criterion and control of transient voltage instability based on wide area branch response[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9470-9481.
- [13] ZHU Lipeng, LU Chao, SUN Yuanzhang, et al. Time series Shaplet classification based online short-term voltage stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1430-1439.
- [14] ZHANG Yuchen, XU Yan, DONG Zhaoyang, et al. A hierarchical self-adaptive data-analytics method for real-time power system short-term voltage stability assessment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 74-84.
- [15] 刘笙, 汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [16] SCHULTZ D G, GIBSON J E. The variable gradient method for generating Lyapunov functions[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, 1962, 81(4): 203-210.
- [17] 陈乾. 复杂电力系统暂态稳定能量函数法研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.  
CHEN Qian. Research on energy function method for transient stability analysis and control of complex power systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [18] KUMAR A, BHAGAT S K. Voltage stability analysis using Lyapunov energy function[C]//2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN), Itanagar, India, 2015: 1-6.
- [19] PRAPROST K L, LOPARO K A. An energy function method for determining voltage collapse during a power system transient[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1994, 41: 635-651.
- [20] 仲悟之, 汤涌. 电力系统微分代数方程模型的暂态电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 10-16.  
ZHONG Wuzhi, TANG Yong. Transient voltage stability analysis of differential-algebra equation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 10-16.
- [21] 陈乾, 沈沉, 刘锋. 端口能量及其在风电系统暂态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 9-16.  
CHEN Qian, SHEN Chen, LIU Feng. Port energy and its application to transient stability analysis of power systems with wind generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 9-16.
- [22] ZHANG Y, ZHANG C, CAI X. Large-signal grid-synchronization stability analysis of PLL-based VSCs using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 788-791.
- [23] FU X, SUN J, HUANG M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study[J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2021, 36(7): 7832-7840.
- [24] ZHAN F, DU Z, HUANG B, et al. Study of transient voltage stability of power system based on heuristic energy function method[C]//2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE),

- 2016, Chengdu, China: 354-358.
- [25] ZHAO M, YUAN X, HU J, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937.
- [26] 周佩朋, 李光范, 孙华东, 等. 基于频域阻抗分析的直驱风电场等值建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 84-90.
- ZHOU Peipeng, LI Guangfan, SUN Huadong, et al. Equivalent modeling method of PMSG wind farm based on frequency domain impedance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 84-90.
- [27] WANG T, HUANG S, GAO M, et al. Adaptive extended Kalman filter based dynamic equivalent method of PMSG wind farm cluster[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2908-2917.
- [28] 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 Taipeng, ZHAO Wei, LI Yongda, et al. Transient synchronization stability analysis of PMSG-based wind farm with virtual inertial control based on an energy function method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 38-48.
- [29] 茅圣杰. 直驱式风机并网电力系统直接法暂态稳定分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [30] 余成波. 自动控制原理[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2006.
- [31] VAN DER SCHAFT A J, DALSMO M, MASCHKE B M. Mathematical structures in the network representation of energy-conserving physical systems[C] // Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control, 1996, Kobe, Japan: 201-206.
- [32] 李颖, 沈沉, 刘锋. 基于能量结构的电力系统振荡分析方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 49-56.
- LI Ying, SHEN Chen, LIU Feng. A methodology for power system oscillation analysis based on energy structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 49-56.
- [33] 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.
- [34] 冯海洋, 束洪春, 杨兴雄, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 111-122.
- FENG Haiyang, SHU Hongchun, YANG Xingxiong, et al. Synergetic control and fault characteristics analysis of hybrid wind farm considering resistance-capacitance crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 111-122.
- [35] LUO A, YAO J, CHEN Z, et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement control strategy of a PLL-based VSC system during asymmetric grid faults[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 1-17.
- [36] 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.
- [37] 乐鹏飞. 永磁直驱风力发电机组低电压穿越技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-05-23

作者简介:

李东东(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析、新能源并网和智能用电; E-mail: powerlidd@163.com

吴祥文(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高比例电力电子化系统的暂态电压稳定分析与评估; E-mail: blackc\_wxx@163.com

孙梦显(1995—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力电子化电力系统建模分析与运行控制。E-mail: sunmengxian0524@163.com

(编辑 张颖)