

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240557

# 计及有功-频率环动态特性影响的储能 VSG 故障特性研究

郑涛, 马英, 王珞秋, 马通芳

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 储能虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术是保障系统频率和电压稳定的重要举措。故障时功率的变化使有功-频率环输出角频率呈非线性变化特征, 深刻影响储能 VSG 故障暂态特征。现有关于储能 VSG 故障特性的研究主要围绕放电状态展开, 且忽略了角频率的变化, 难以保证电压电流等电气量的解析精度。为此, 对储能 VSG 在不同运行状态及运行状态快速切换时的电气量暂态特征展开研究, 提出了一种计及有功-频率环动态特性影响的储能 VSG 故障特性解析方法。以对称短路为场景, 首先分析了故障后角频率的变化机理, 并提出了基于等面积原则的简化方法, 阐明了角频率变化影响下电网电压的非线性变化特征。进一步, 基于电网电压暂态特性对短路电流的影响路径, 综合考虑无功-电压环和虚拟阻抗环的动态响应建立短路电流的解析表达式。相较于传统忽略有功-频率环动态特性的解析方法, 所提方法准确刻画了储能 VSG 故障后电压电流等电气量故障暂态特征, 所得结论可为构网型保护研究提供重要参考。

**关键词:** 储能虚拟同步发电机; 有功-频率环; 充放电运行状态; 故障特性; 对称短路

## Study on fault characteristics of energy storage VSG considering the dynamic characteristics of the active power-frequency loop

ZHENG Tao, MA Ying, WANG Luoqiu, MA Tongfang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** The virtual synchronous generator (VSG) technology for energy storage is an important measure to ensure system frequency and voltage stability. During faults, power fluctuations cause nonlinear changes of the output angular frequency of the active power-frequency loop, significantly impacting the transient fault characteristics of energy storage VSG. Existing research on the fault characteristics of energy storage VSG mainly focuses on the discharging state and often neglects changes in angular frequency, making it difficult to ensure the accuracy of analytical calculations for electrical quantities such as voltage and current. To address this, this paper studies the transient characteristics of energy storage VSG in different operating states and during rapid switching of states. A new fault characteristic analysis method of energy storage VSG is proposed that takes into account the dynamic characteristics of the active power-frequency loop. Taking symmetrical short-circuit faults as the scenario, the mechanism of angular frequency variation after the fault is analyzed, and a simplified method based on the equal area principle is proposed to clarify the nonlinear characteristics of the grid voltage change under the influence of angular frequency changes. Furthermore, by analyzing how the transient characteristics of voltage affect the short-circuit current, the analytical expression of short-circuit current is established by comprehensively considering the dynamic response of the reactive power-voltage loop and the virtual impedance loop. Compared with traditional analytical methods that ignore the dynamic characteristics of the active power-frequency loop, the proposed method can accurately characterize the transient fault characteristics of electrical quantities such as voltage and current in energy storage VSG, while the conclusions can provide valuable references for protection strategy research in grid-forming scenarios.

This work is supported by the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U2166205).

**Key words:** energy storage virtual synchronous generator; active power-frequency loop; charge/discharge operating state; fault characteristics; symmetrical short circuit

**基金项目:** 国家自然科学基金联合基金项目资助(U2166205); 国家电网有限公司科技项目资助(SGTYHT/21-JS-223)  
“电化学储能电站接入系统继电保护关键技术研究”

## 0 引言

近年来,为实现能源结构转型升级,风电、光伏等随机性、波动性电源迅猛发展,电力系统在能量平衡方面面临重大挑战。储能系统因其能快速存储和释放能量,在增强可再生能源消纳和提高供电可靠性方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。储能系统经电力电子变流器接入电网,虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制技术模拟同步发电机机械和电磁特性,能够为“双高”电力系统提供电压和惯量支撑。VSG技术在储能系统中的应用成为保障新型电力系统稳定运行的有效举措之一<sup>[3]</sup>。

与风电、光伏不同,储能系统可工作在充、放电两种状态。储能系统故障特性与充放电运行状态有关<sup>[4-5]</sup>:不同运行状态所对应功率流向的差异将通过物理方程和控制方程影响电压电流的变化特征<sup>[6]</sup>。同时,储能需根据系统频率变化实现充放电状态的快速切换。若故障后仍为充电状态,储能系统可能因直流母线电压持续下降而退出运行<sup>[7]</sup>,因此,故障前储能系统可运行在充、放电两种状态,而故障后为实现低电压穿越运行在放电状态<sup>[8]</sup>。能量双向流动的特点使储能 VSG 故障后电气量暂态特征更加复杂。故障特征分析是继电保护适应性分析和新原理研究的前提和基础,因此有必要对储能 VSG 在不同运行状态及运行状态快速切换时的电气量故障暂态特性开展深入研究。

充放电不同运行状态通过有功-频率环影响储能 VSG 故障特性。现有关于储能 VSG 有功-频率环动态特性的研究主要通过建立并网有功闭环小信号模型<sup>[9-13]</sup>分析有功功率参考值阶跃变化时有功功率实际值和角频率的变化特征,侧重于提升储能 VSG 并网有功响应,尚未进一步研究电压电流等电气量的暂态特性,且所得结论并不适用于故障场景。

常用电压源串阻抗模型描述 VSG 的外特性<sup>[14]</sup>,文献[15-16]在电压源串阻抗模型基础上进一步考虑下垂和 VSG 功率环的动态特性,提出一种暂态电流迭代算法,但迭代的方法对短路电流暂态特性刻画不够直观。进一步地,文献[17-18]在故障时忽略功率环的动态响应,以内电势幅值和角频率恒定为前提,基于逆变器并网简化电路建立短路电流表达式。该方法未考虑控制环节的影响,无法准确描述短路电流的暂态特征。在此基础上,文献[19]以忽略有功-频率环动态特性为前提,考虑故障期间无功-电压环中内电势的变化<sup>[20]</sup>,通过联立各环节控制方程和电路方程建立短路电流的解析表达式。

事实上,为实现低电压穿越,储能 VSG 有功功率参考值会发生变化。功率变化使有功-频率环输出角频率呈非线性变化,储能 VSG 角频率和电网角频率的差异将通过坐标变换深刻影响电压电流的暂态特征。此外,储能 VSG 控制环节多,控制方程和物理方程交叉耦合、相互影响,电压的变化将通过物理方程和控制方程对短路电流暂态特征产生影响。因此,虽然现有关于储能 VSG 故障特性的研究已取得一定进展,但仍存在对关键控制环节考虑不全面的问题<sup>[14-19]</sup>,有功-频率环动态特性影响下角频率的变化特征、角频率变化对储能 VSG 电气量暂态特征的影响机理及电压电流等电气量解析表达式的建立等问题需进一步解决。

针对上述问题,本文通过研究储能 VSG 在不同运行状态及运行状态快速切换时电压电流等电气量的暂态特征,提出一种计及有功-频率环动态特性影响的储能 VSG 故障特性解析方法。以对称短路为场景,首先,分析有功-频率环动态特性并建立角频率的表达式;其次,提出基于等面积原则的简化方法,明晰角频率变化影响下电网电压的暂态特征;然后,基于电网电压变化特征的影响,综合考虑无功-电压环和虚拟阻抗环的动态响应,并建立内电势和短路电流的解析表达式;最后,通过仿真验证本文所建立储能 VSG 故障特性解析表达式的正确性。

## 1 储能 VSG 低电压穿越策略与有功-频率环动态特性分析

储能 VSG 通过模拟同步发电机电磁和机械特性为系统提供电压和惯性支撑<sup>[21]</sup>,其电路拓扑和控制框图如图 1 所示。图 1(a)中: $R_f$ 、 $L_f$ 、 $C_f$  分别为滤波电感内阻、滤波电感与滤波电容; $v_{abc}$ 、 $u_{abc}$  分别为逆变器出口电压和电网电压; $R_g$ 、 $L_g$  分别为线路电阻、电感; $i_{abc}$  为逆变器输出电流。图 1(b)中: $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  和  $P_c$ 、 $Q_c$  分别为有功、无功功率参考值和实际值; $i_d^*$ 、 $i_q^*$  和  $i_d$ 、 $i_q$  分别为电流参考值和实际电流值的  $d$ 、 $q$  轴分量; $\theta_{ref}$ 、 $E_{ref}$  分别为内电势相位角和幅值; $\omega_N$  和  $\omega$  分别为角频率额定值和实际值; $J$  为惯性时间常数; $D$  为阻尼系数; $K$  为无功-电压积分系数; $U^*$  为电压基准值; $e_d$ 、 $e_q$  和  $u_d$ 、 $u_q$  分别为内电势和电网电压  $d$ 、 $q$  轴分量; $R_v$ 、 $L_v$  分别为虚拟电阻、电感; $v_d^*$ 、 $v_q^*$  分别为逆变器出口电压参考值的  $d$ 、 $q$  轴分量; $v_{abc}^*$  为逆变器出口电压参考值。

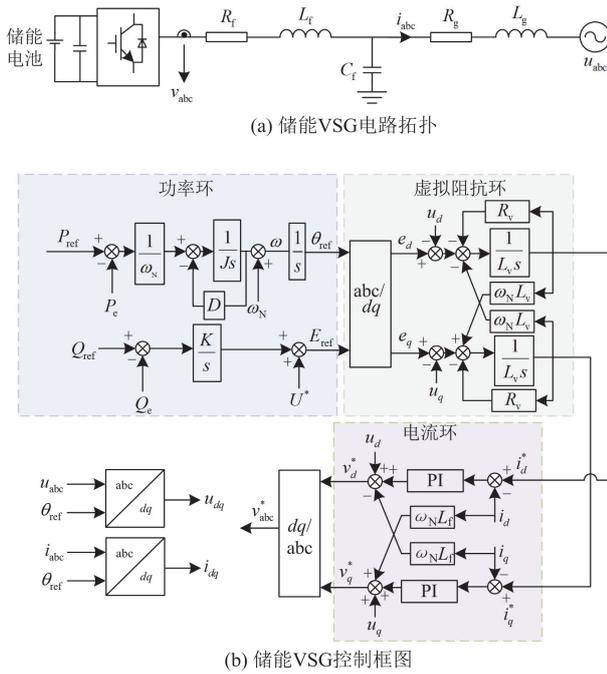


图 1 储能 VSG 电路拓扑和控制框图

Fig. 1 Energy storage VSG circuit topology and control block diagram

### 1.1 储能 VSG 低电压穿越策略

储能 VSG 可运行在充、放电状态,也可根据系统实时工况实现充放电运行状态的快速切换。发生对称短路时,系统频率下降。当  $0.1 < \text{SOC} < 0.9$  时<sup>[22]</sup>,储能 VSG 应为放电状态以阻止系统频率进一步恶化。因此,故障前无论储能 VSG 运行在充电或放电状态,故障后均为放电状态<sup>[7]</sup>。充放电状态的改变对应有功功率流向的变化,以功率流出为正,故障前后储能 VSG 有功功率参考值的变化如图 2 所示。

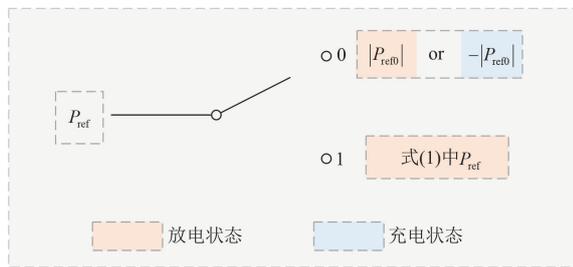


图 2 故障前后有功参考值变化

Fig. 2 Active power reference value changes before and after the fault

图 2 中,  $|P_{\text{ref}0}|$  为故障前有功功率参考值的绝对值,故障时开关由“0”切换至“1”。

为实现低电压穿越,储能 VSG 还需满足故障

限流和无功功率支撑。故障后内电势和电网之间较大的电压差增加了过流风险,本文通过引入电网电压前馈的方法抑制过流,即设置无功-电压环中电压基准值  $U^*$  为电网电压  $U$ <sup>[20]</sup>。同时,根据《电化学储能系统储能变流器技术规范》GB/T 34120-2017,当  $0.2 \leq U_T \leq 0.85$  时,  $U_T$  为电网电压标幺值,储能 VSG 向电网注入的功率应满足式(1)。

$$\begin{cases} P_{\text{ref}} = \min \{ U |i_{d0}|, U \sqrt{I_{\text{max}}^2 - (1.6(0.85 - U_T)I_N)^2} \} \\ Q_{\text{ref}} = 1.6(0.85 - U_T)I_N U \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $|i_{d0}|$  为故障前  $d$  轴电流绝对值;  $U$  为电网电压;  $I_N$  为额定电流;  $I_{\text{max}}$  为逆变器耐流值,本文取  $1.2I_N$ 。

### 1.2 有功-频率环动态特性对储能 VSG 故障特性的影响分析

有功-频率环动态特性是指在调节有功功率参考值和实际值的偏差时角频率的变化过程。有功-频率环控制方程为

$$P_{\text{ref}} - P_e - D\Delta\omega\omega_N = J\omega_N \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (2)$$

式中,  $\Delta\omega = \omega - \omega_N$ 。

如式(2)所示,故障时有功参考值和实际值的突变通过有功-频率环使储能 VSG 角频率改变。储能 VSG 一般采用内电势定向的矢量控制策略<sup>[18]</sup>,角频率的变化将对坐标变换矩阵产生影响。

内电势以角速度  $\omega(t)$  旋转时,派克变换矩阵  $T_{2r/3s}$  如式(3)所示。

$$T_{2r/3s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\left(\int_0^t \omega(x) dx + \theta_a\right) & \cos\left(\int_0^t \omega(x) dx + \theta_b\right) & \cos\left(\int_0^t \omega(x) dx + \theta_c\right) \\ -\sin\left(\int_0^t \omega(x) dx + \theta_a\right) & -\sin\left(\int_0^t \omega(x) dx + \theta_b\right) & -\sin\left(\int_0^t \omega(x) dx + \theta_c\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\theta_a = \theta_0$ ;  $\theta_b = \theta_0 - 2\pi/3$ ;  $\theta_c = \theta_0 + 2\pi/3$ 。其中  $\theta_0$  为  $t=0$  时  $d$  轴超前 A 轴的角度。

根据图 1(b),电网电压和电流经派克变换后参与控制环节。有功-频率环动态特性在影响电网电压的同时还经虚拟阻抗环影响电流参考值。因电流内环响应时间较短<sup>[23]</sup>,可认为电流实际值和参考值相等。因此,本文主要分析有功-频率环动态特性影响下电网电压和电流参考值的变化特征。

故障前内电势和电网电压均以角速度  $\omega_N$  旋转,故障后内电势以角速度  $\omega$  旋转,而电网电压仍以  $\omega_N$  旋转,旋转角速度的差异使内电势和电网电压之间的相位关系发生变化。现以故障前储能 VSG 为充电状态说明故障前后内电势和电网电压的相位变化

情况,如图3所示,充电状态下电网电压超前于内电势。故障发生后,储能VSG切换为放电状态。旋转角速度的差异使内电势和电网电压之间的夹角先变小后反向增大,最终实现放电状态下内电势超前于电网电压。故障前、后内电势和电网电压分别对应图3中黑色实线、红色虚线和黑色虚线。

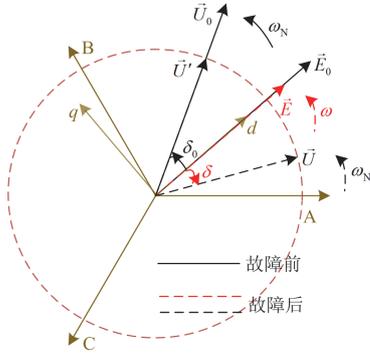


图3 故障前后电压相位关系变化示意图(故障前为充电状态,故障后为放电状态)

Fig. 3 Schematic diagram of the change of voltage phase relationship before and after the fault (charged before the fault, discharged after the fault)

图3中: $\bar{U}_0$ 、 $\bar{U}'$ 和 $\bar{U}$ 分别为故障前、故障瞬间和故障稳态电网电压; $\bar{E}_0$ 、 $\bar{E}$ 分别为故障前、后内电势; $\delta_0$ 、 $\delta$ 分别为故障前、后内电势和电网电压之间的夹角,即功角。

将电网三相电压 $[u_a, u_b, u_c]$ 经派克变换矩阵,转变到两相旋转坐标系下,得 $u_{dq}$ 为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = T_{2r/3s} [u_a \ u_b \ u_c]^T = \begin{bmatrix} U \cos(\delta(t)) \\ -U \sin(\delta(t)) \end{bmatrix} \\ \delta(t) = \int_0^t \Delta\omega(x) dx + \delta_0 \end{cases} \quad (4)$$

传统储能VSG故障特性研究方法忽略有功-频率环的动态特性<sup>[19]</sup>,认为故障后 $\delta$ 、 $u_{dq}$ 均保持不变。事实上,受角频率变化的影响,如式(4)所示, $\delta$ 、 $u_{dq}$ 均会呈非线性变化特征。以故障前为充电状态为例,故障前后 $\delta$ 、 $u_{dq}$ 的变化波形如图4所示。

如图4所示,故障后 $\delta$ 在小范围内变化。在 $\delta$ 变化范围影响下, $u_d$ 的变化趋势较平缓,而 $u_q$ 的数值变化范围较大,这是 $\cos\delta$ 和 $\sin\delta$ 函数对 $\delta$ 在小范围内变化时灵敏程度不同所导致的。

综上所述,角频率的变化深刻影响储能VSG故障特性。鲜有文献讨论储能VSG在不同运行状态及运行状态快速切换时有功-频率环的动态特性,更未揭示有功-频率环动态特性影响下储能VSG电压

电流等电气量故障暂态特征,关于储能VSG电气量暂态特性的研究工作亟需进一步完善。

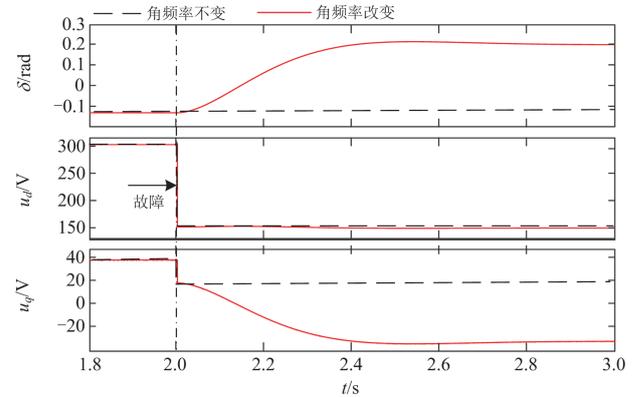


图4 故障前后 $\delta$ 、 $u_{dq}$ 变化波形(故障前为充电状态,故障后为放电状态)

Fig. 4 Waveforms of  $\delta$  and  $u_{dq}$  changes before and after the fault (charged before the fault, discharged after the fault)

## 2 计及有功-频率环动态特性影响时电网电压解析表达式的建立

受有功-频率环动态特性的影响,角频率发生改变,角频率的变化通过坐标变换使 $u_{dq}$ 呈现复杂的变化特征。此外, $u_{dq}$ 通过虚拟阻抗环影响 $i_{dq}$ 的同时又通过无功-电压环影响内电势 $E_{ref}$ 。控制方程和物理方程相互影响、解析计算复杂,有功-频率环的动态过程对储能VSG电气量暂态特性的影响路径如图5所示。

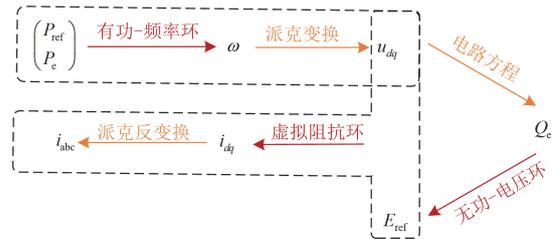


图5 有功-频率环动态特性影响路径图

Fig. 5 Path diagram affected by dynamic characteristics of the active power-frequency loop

基于图5,本文综合考虑各环节控制方程和物理方程的影响建立储能VSG电压电流等电气量解析表达式,求解思路如图6所示,可分为3步:

1) 分析故障后有功参考值和实际值的变化特征,联立有功-频率控制方程和有功-频率电路方程建立角频率变化量 $\Delta\omega(t)$ 的表达式;

2) 考虑 $\Delta\omega(t)$ 是通过坐标变换对电压电流产生影响,提出一种基于等面积原则的简化方法明晰角

频率变化影响下电网电压的暂态特征;

3) 基于  $u_{dq}$  通过虚拟阻抗环和无功-电压环对短路电流暂态特性的影响, 联立经虚拟阻抗环所得方程  $i_{dq} = g(E_{ref})$  和无功-电压环所得方程  $E_{ref} = f(i_{dq})$  建立内电势和短路电流的解析表达式。

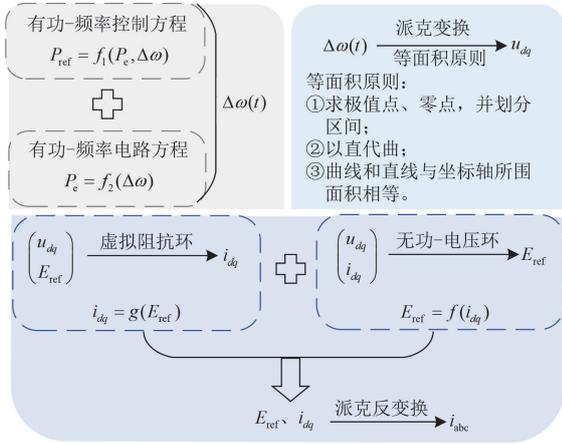


图6 储能 VSG 故障特性研究思路图

Fig. 6 Idea diagram of energy storage VSG fault characteristics research

## 2.1 储能 VSG 输出角频率解析表达式的建立

根据功率计算理论<sup>[10]</sup>,  $P_e$  可表示为

$$P_e = \frac{1}{X} EU \sin \delta = k_p \delta = k_p \left( \int_0^t \Delta\omega(x) dx + \delta_0 \right) \quad (5)$$

式中:  $E$  为储能 VSG 内电势;  $X$  为储能 VSG 内电势和电网电压之间的总阻抗;  $k_p = EU/X$ 。

将式(5)代入式(2)所示的有功-频率环控制方程, 可得

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} + \frac{D}{J} \Delta\omega + \frac{k_p}{J\omega_N} \int_0^t \Delta\omega dt = \frac{P'_{ref}}{J\omega_N} \quad (6)$$

式中,  $P'_{ref} = P_{ref} - k_p \delta_0$ 。

故障时,  $P'_{ref}$  发生突变。设其突变量为  $\Delta P$ , 将  $\Delta P$  转换至频域为  $\Delta P/s$ 。进一步结合式(6), 可得  $\Delta\omega(s)$  为

$$\Delta\omega(s) = \frac{s}{J\omega_N s^2 + D\omega_N s + k_p} \cdot \frac{\Delta P}{s} \quad (7)$$

将  $\Delta\omega(s)$  进一步转换到时域<sup>[24]</sup>, 得  $\Delta\omega(t)$  为

$$\Delta\omega(t) = M e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t) \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{k_p}{J\omega_N}} & \xi = \frac{D\sqrt{\omega_N}}{2\sqrt{Jk_p}} \\ \omega_d = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n & M = \frac{\Delta P}{J\omega_N \omega_d} \end{cases} \quad (9)$$

$\Delta\omega(t)$  的变化将通过图 5 所示的路径影响电压电流的暂态特征。由式(8)可知,  $\Delta\omega(t)$  呈现较为复杂的变化特征, 这极大地增加了储能 VSG 电压电流解析计算的难度以致无法求解, 故需对  $\Delta\omega(t)$  的表达式进行合理简化。

## 2.2 计及角频率变化影响时电网电压解析表达式的建立

基于  $\Delta\omega(t)$  曲线与时间轴所围区域面积为功角的物理意义, 本文提出一种基于等面积原则的处理方法, 具体可分为 3 步: ①基于零点和极值点所出现的位置, 将  $\Delta\omega(t)$  分为若干个区间; ②在不同的区间段内, 用一次函数来等效替代  $\Delta\omega(t)$  的变化过程; ③根据不同区间段内待求一次函数和  $\Delta\omega(t)$  与坐标轴所围面积相等的原则确定一次函数的表达式。

首先求解  $\Delta\omega(t)$  的零点和极值点。零点处函数值为 0, 故有

$$\Delta\omega(t) = M e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t) = 0 \quad (10)$$

进一步可得  $\Delta\omega(t)$  的零点为

$$t = n\pi / \omega_d \quad n=0,1,2,\dots \quad (11)$$

同时, 极值点处导数为 0, 对  $\Delta\omega(t)$  求导可得

$$\Delta\omega'(t) = \frac{M}{\omega_d} e^{-\xi\omega_n t} [\cos(\omega_d t) - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_d t)] \quad (12)$$

令  $\Delta\omega'(t)$  为 0, 可得  $\Delta\omega(t)$  的极值点为

$$\omega_d t = n\pi + \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad n=0,1,2,\dots \quad (13)$$

本文所提等面积原则在保证解析精度的同时降低计算的复杂性。考虑响应速度和稳定性的要求, 实际现场中根据最佳阻尼比 ( $\xi = 0.707$ ) 设计系统。以最佳阻尼比系统为例,  $\Delta\omega(t)$  的简化原理具体如图 7 所示。

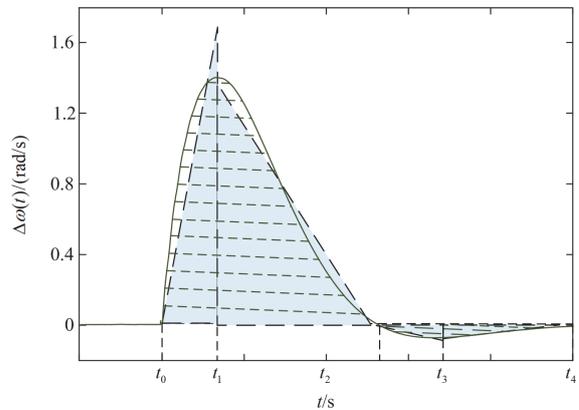


图7  $\Delta\omega(t)$  简化原理图

Fig. 7  $\Delta\omega(t)$  simplified schematic diagram

图 7 中:  $t_0$  为故障发生时刻;  $t_1$ 、 $t_3$  为极值点;  $t_2$ 、 $t_4$  为零点。

如图 7 所示, 用一次函数等效替代  $\Delta\omega(t)$  的变化过程, 并基于等面积原则确定一次函数的斜率  $k'$  和截距  $b$ 。求解过程如式(14)所示。

$$\begin{cases} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \Delta\omega(x)dx = \frac{k'(t_{n+1} - t_n)^2}{2} & n = 0, 1, 2, 3 \\ b = k' \cdot (t_{n+1} - t_n) \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得图 7 中各个区间段内  $\Delta\omega(t)$  的表达式。限于篇幅, 本文以第一段为例展开分析和计算, 其他几段同理可得。

将式(4)中  $\Delta\omega(t)$  用一次函数替代后, 得  $u_{dq}$  的表达式为

$$\begin{cases} u_d(t) = U \cos(kt^2 + \delta_0) \\ u_q(t) = U \sin(kt^2 + \delta_0) \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $k = 0.5k'$ 。

考虑故障持续时间较短, 且已将其分为若干个区间段, 故可作简化, 如式(16)所示。

$$\cos(kt^2) \approx 1, \quad \sin(kt^2) \approx kt^2 \quad (16)$$

联立式(15)与式(16), 得  $u_{dq}$  的表达式为

$$\begin{cases} u_d(t) = U(\cos \delta_0 - kt^2 \sin \delta_0) \\ u_q(t) = U(kt^2 \cos \delta_0 + \sin \delta_0) \end{cases} \quad (17)$$

如式(17)所示, 有功-频率环的动态特性使  $u_{dq}$  呈现非线性的变化特征。

### 3 计及有功-频率环动态特性影响时储能 VSG 短路电流解析表达式的建立

根据图 5 所述有功-频率环动态特性对储能 VSG 故障特性的影响路径,  $u_{dq}$  的变化将进一步通过虚拟阻抗环和无功-电压环影响短路电流暂态特征。因此, 在第 2 节建立  $u_{dq}$  表达式的基础上, 综合考虑无功-电压环和虚拟阻抗环的动态特性即可建立短路电流的解析表达式。

#### 3.1 基于虚拟阻抗环构建 $i_{dq}$ 和 $E_{\text{ref}}$ 的关系

如图 1 所示, 虚拟阻抗环控制方程为

$$\begin{cases} e_d - u_d = L_v \frac{di_d^*}{dt} + R_v i_d^* - \omega_N L_v i_q^* \\ e_q - u_q = L_v \frac{di_q^*}{dt} + R_v i_q^* + \omega_N L_v i_d^* \end{cases} \quad (18)$$

频域可以化微分方程为代数方程, 简化计算。将式(18)进行拉普拉斯变换, 可得

$$\begin{cases} e_d(s) - u_d(s) = (L_v s + R_v) i_d^*(s) - \omega_N L_v i_q^*(s) - L_v i_d^*(0) \\ e_q(s) - u_q(s) = (L_v s + R_v) i_q^*(s) + \omega_N L_v i_d^*(s) - L_v i_q^*(0) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $e_{dq}(s)$ 、 $u_{dq}(s)$ 、 $i_{dq}^*(s)$  分别为内电势、电网电压、电流参考值  $dq$  轴分量在频域的表达式;  $i_d^*(0)$  和  $i_q^*(0)$  分别为故障前电流参考值的  $d$ 、 $q$  轴分量。

将式(19)进一步分离变量, 可得

$$\begin{cases} i_d^*(s) = A_1(s) \cdot [e_d(s) - u_d(s)] + A_2(s) \cdot [e_q(s) - u_q(s)] + \\ \quad A_3(s) \cdot i_d^*(0) + A_4(s) \cdot i_q^*(0) \\ i_q^*(s) = A_1(s) \cdot [e_q(s) - u_q(s)] - A_2(s) \cdot [e_d(s) - u_d(s)] - \\ \quad A_4(s) \cdot i_d^*(0) + A_3(s) \cdot i_q^*(0) \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $A_1(s) - A_4(s)$  的具体表达式见附录 A1。

将  $A_1(s) - A_4(s)$  抽象为  $H(s)$ , 将  $e_d(s) - u_d(s)$ 、 $e_q(s) - u_q(s)$  抽象为  $F(s)$ 。根据卷积定理<sup>[25]</sup>, 可得

$$i_{dq}^*(t) = L^{-1}[H(s) \cdot F(s)] = \int_0^t H(x) \cdot F(t-x) dx \quad (21)$$

式中:  $L^{-1}$  为拉式逆变换;  $x$  为积分变量。

储能 VSG 采用内电势定向的矢量控制策略, 进一步结合 2.2 节中所求  $u_{dq}$  的表达式(式(17)), 可得

$$\begin{cases} L^{-1}[e_d(s) - u_d(s)] = E_{\text{ref}} - U(\cos \delta_0 - kt^2 \sin \delta_0) \\ L^{-1}[e_q(s) - u_q(s)] = -U(kt^2 \cos \delta_0 + \sin \delta_0) \end{cases} \quad (22)$$

此外, 由式(18)可得  $i_d^*(0)$  和  $i_q^*(0)$  的表达式为

$$\begin{cases} i_d^*(0) = \frac{1}{|Z_v|} [E_0 \cos \varphi_v - U_0 \cos(\delta_0 + \varphi_v)] \\ i_q^*(0) = \frac{1}{|Z_v|} [-E_0 \sin \varphi_v + U_0 \sin(\delta_0 + \varphi_v)] \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $|Z_v|$  和  $\varphi_v$  的表达式见附录 A1。

结合式(21)一式(23), 并忽略电流内环响应时间, 将式(20)转变至时域的结果为

$$\begin{cases} i_d(t) = \frac{1}{|Z_v|} [E_{\text{ref}} \cos \varphi_v - U \cos(\varphi_v - \delta_0)] + \\ \quad \frac{e^{-\tau_v t}}{|Z_v|} \left[ (E_0 - E_{\text{ref}}) \cos(\omega_N t + \varphi_v) + (U - U_0) \cos(\omega_N t + \varphi_v - \delta_0) \right] + \\ \quad k[A_4 \cos(\omega_N t + \theta' - \delta_0) e^{-\tau_v t} + B_1 t^2 + C_1 t + D_1] \\ i_q(t) = \frac{1}{|Z_v|} [U \sin(\varphi_v - \delta_0) - E_{\text{ref}} \sin \varphi_v] + \\ \quad \frac{e^{-\tau_v t}}{|Z_v|} \left[ (E_{\text{ref}} - E_0) \sin(\omega_N t + \varphi_v) + (U_0 - U) \sin(\omega_N t + \varphi_v - \delta_0) \right] + \\ \quad k[A_2 \sin(\omega_N t + \theta' - \delta_0) e^{-\tau_v t} + B_2 t^2 + C_2 t + D_2] \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $\tau_v$ 、 $\theta'$ 、 $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$  和

$D_2$  的具体表达式见附录 A1。

### 3.2 基于无功-电压环构建 $E_{\text{ref}}$ 和 $i_{dq}$ 的关系

无功-电压环实现对内电势的调节, 其控制方程为

$$E_{\text{ref}} = U + \frac{K}{s}(Q_{\text{ref}} - Q_c) \quad (25)$$

其中, 无功功率  $Q_c$  可进一步表示为

$$Q_c = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q) \quad (26)$$

将式(26)代入式(25)中, 并将其进一步求导可得

$$\frac{dE_{\text{ref}}}{dt} = KQ_{\text{ref}} - \frac{3K}{2}(u_q i_d - u_d i_q) \quad (27)$$

式中,  $u_d$ 、 $u_q$  和  $i_d$ 、 $i_q$  的表达式分别如式(17)和式(24)。

### 3.3 储能 VSG 短路电流表达式的建立

根据 3.1 节和 3.2 节所述内容, 联立式(24)和式(27), 即可得到内电势和短路电流的解析表达式。

将式(24)代入式(27)中, 得到关于  $E_{\text{ref}}$  的一阶微分方程为

$$\frac{dE_{\text{ref}}}{dt} = -a_1 E_{\text{ref}} + a_2 + q_4(t) + \begin{bmatrix} kt^2 h_2 \cos(\omega_N t + \theta_{h_2}) e^{-\tau_v t} + \\ h_2 \sin(\omega_N t + \theta_{h_2}) e^{-\tau_v t} \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $h_2$ 、 $\theta_{h_2}$ 、 $q_4(t)$  的具体表达式见附录 A2。

求解该微分方程, 可得到  $E_{\text{ref}}$  的表达式为

$$E_{\text{ref}} = Ce^{-a_1 t} + \frac{a_2}{a_1} + N(t) + A_4 e^{-\tau_v t} \left[ \sin(\omega_N t + \theta'_1) + k \left( \frac{-t^2 \cos(\omega_N t + \theta'_2)}{2tM \sin(\omega_N t + \theta'_3)} \right) \right] \quad (29)$$

式中:  $C$  为常数;  $N(t)$ 、 $A_4$ 、 $\theta'_1$ 、 $\theta'_2$ 、 $\theta'_3$  的具体表达式见附录 A3。

将  $E_{\text{ref}}$  的表达式(式(29))代入式(24)中, 即可得到  $i_{dq}$ , 整理后得

$$\begin{cases} i_d(t) = n_{d0} + n_{d3} e^{-\tau_v t} \cos(\omega_N t + \theta_{d3}) + \\ \quad n_{d1} e^{-a_1 t} + n_{d4} e^{-\tau_1 t} \cos(\omega_N t + \theta_{d4}) + \\ \quad n_{d2} e^{-2\tau_v t} + n_{d5} e^{-2\tau_v t} \cos(2\omega_N t + \theta_{d5}) \\ i_q(t) = n_{q0} + n_{q3} e^{-\tau_v t} \sin(\omega_N t + \theta_{q3}) + \\ \quad n_{q1} e^{-a_1 t} + n_{q4} e^{-\tau_1 t} \sin(\omega_N t + \theta_{q4}) + \\ \quad n_{q2} e^{-2\tau_v t} + n_{q5} e^{-2\tau_v t} \sin(2\omega_N t + \theta_{q5}) \end{cases} \quad (30)$$

式中,  $\tau_1$ 、 $n_{d0}$ — $n_{d5}$ 、 $\theta_{d3}$ — $\theta_{d5}$ 、 $n_{q0}$ — $n_{q5}$ 、 $\theta_{q3}$ — $\theta_{q5}$  的具体表达式见附录 A4。

派克反变换同样会受到有功-频率环动态特性的影响。经本文分析, 可用  $\omega_N + kt$  等效替代  $\omega(t)$  的变化过程。此时派克反变换矩阵为

$$T_{3s/2r} = \begin{bmatrix} \cos((\omega_N + kt)t + \theta_a) & -\sin((\omega_N + kt)t + \theta_a) \\ \cos((\omega_N + kt)t + \theta_b) & -\sin((\omega_N + kt)t + \theta_b) \\ \cos((\omega_N + kt)t + \theta_c) & -\sin((\omega_N + kt)t + \theta_c) \end{bmatrix} \quad (31)$$

将式(31)进行派克反变换即可得短路电流解析式。以 a 相为例, 有

$$i_a(t) = [\cos((\omega_N + kt)t + \theta_a) - \sin((\omega_N + kt)t + \theta_a)] [i_d \ i_q]^T = \\ n_{a0} \sin(\omega_N t + \theta_{a0}) + n_{a1} e^{-a_1 t} \sin(\omega_N t + \theta_{a1}) + \\ n_{a2} e^{-2\tau_v t} \sin(\omega_N t + \theta_{a2}) + n_{a5} e^{-\tau_1 t} + \\ n_{a3} e^{-\tau_v t} \sin(2\omega_N t + \theta_{a3}) + n_{a6} e^{-\tau_v t} + \\ n_{a4} e^{-2\tau_v t} \sin(3\omega_N t + \theta_{a4}) \quad (32)$$

式中,  $n_{a0}$ — $n_{a6}$ 、 $\theta_{a0}$ — $\theta_{a4}$  的具体表达式见附录 A5。

## 4 仿真验证

为验证计及有功-频率环动态特性影响时储能 VSG 故障特性研究理论分析的正确性, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建如图 1(a)所示的储能 VSG 并网系统。故障前储能 VSG 以单位功率因数运行, 额定电压为 311 V。3 s 时发生故障, 故障时电网电压跌落至 0.5 p.u., 经计算得充/放电状态下有功参考值由 -10 kW/10 kW 变为 5.31 kW、无功参考值由 0 kvar 变为 2.8 kvar, 其他参数见表 1。

表 1 储能 VSG 并网仿真模型参数

Table 1 Energy storage VSG grid-connected simulation model parameters

参数	数值	参数	数值
$J/(\text{kg}/\text{m}^2)$	1.15	$K$	0.1
$U_{dc}/\text{V}$	800	$L_v/\text{mH}$	6
$C_f/\mu\text{F}$	30	$R_v/\Omega$	0.2
$L_r/\text{mH}$	10	$R_r/\Omega$	0.4
$D$	13	$f_N/\text{Hz}$	50

经第 2 节和第 3 节理论分析, 储能 VSG 故障特性研究的已求解量主要包括角频率变化量  $\Delta\omega(t)$  (式(8))、电网电压  $dq$  轴分量  $u_{dq}(t)$  (式(17))、内电势  $E_{\text{ref}}$  (式(29))、逆变器输出电流  $dq$  轴分量  $i_{dq}(t)$  (式(30))和 A 相电流  $i_a(t)$  (式(32))。本节分别给出故障前储能 VSG 运行在充电、放电两种状态下含上述变量的仿真波形和解析波形, 并进行比较分析, 以验证理论分析的正确性。

#### 4.1 储能 VSG 故障特性验证(故障前为充电状态)

储能 VSG 故障前运行在充电状态下, 故障时受低电压穿越策略的影响会转为放电状态。图 8 给出电网电压跌落至 0.5 p.u. 时  $\Delta\omega(t)$  的变化波形。如图 8 所示, 根据零点和极值点所出现的位置可将  $\Delta\omega(t)$  的变化过程分为 4 个区间, 每个区间所对应的时间分别为  $\Delta t_1 - \Delta t_4$ 。本文以第一区间段为例展开分析和验证, 经计算得  $\Delta t_1$  为 0.14 s。

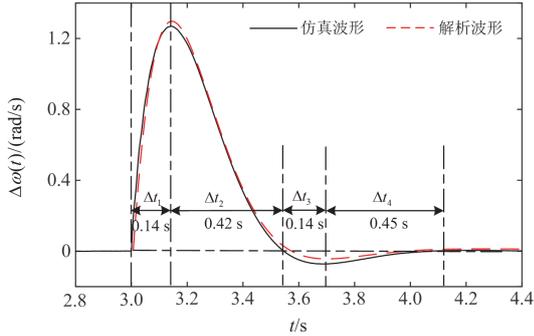


图 8 角频率变化量波形

Fig. 8 Waveform of angular frequency variation

基于等面积原则的处理方法在不同区间段内用一次函数代替  $\Delta\omega(t)$  的变化过程。由式(14)计算得第一区间段一次函数斜率  $k'$  为 12.5472, 现基于该计算结果展开验证, 图 9—图 12 分别为电网电压跌落至 0.5 p.u. 时,  $u_{dq}(t)$ 、 $E_{ref}$ 、 $i_{dq}(t)$  和  $i_a(t)$  在故障后 0.14 s 内仿真波形和解析波形的对比图。

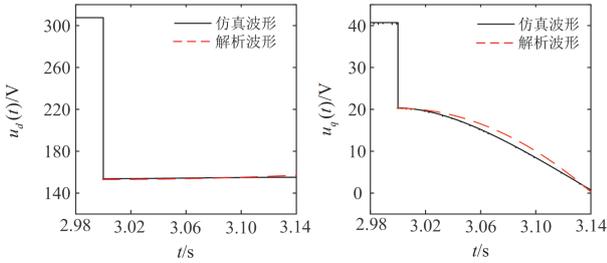


图 9 dq 轴电压波形

Fig. 9 dq axis voltage waveform

根据图 9, 故障后  $u_d(t)$  变化相对平缓, 而  $u_q(t)$  则由正值逐渐下降至 0 后变为负数。这是由于充电状态下, 电网电压超前于内电势,  $u_d(t)$  和  $u_q(t)$  均为正值。受充放电状态改变的影响, 电网电压由超前于内电势转变为滞后, 这使  $u_q(t)$  呈现由正到负的转变。

根据图 10, 故障后受低电压穿越策略的影响, 内电势瞬间跌落后逐渐上升。由图 11 可知,  $i_d(t)$  和  $i_q(t)$  呈现较为复杂的变化特征, 由充电状态变为放

电状态时  $i_d(t)$  由负值逐渐增大至正值,  $i_q(t)$  则受无功功率参考值增大的影响数值增大。将  $i_{dq}(t)$  转变至三相静止坐标系下可得 A 相短路电流的变化波形如图 12 所示, 故障前电流为 21.5 A, 故障后在第一阶段内电流幅值下降。此外, 图 8—图 12 中仿真波形和解析波形的吻合性验证了本文所建解析表达式的正确性。

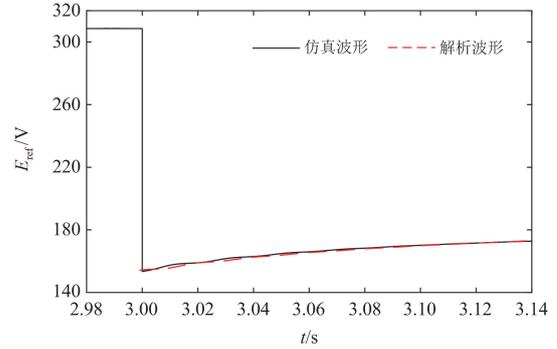


图 10 内电势波形

Fig. 10 Internal electric potential waveform

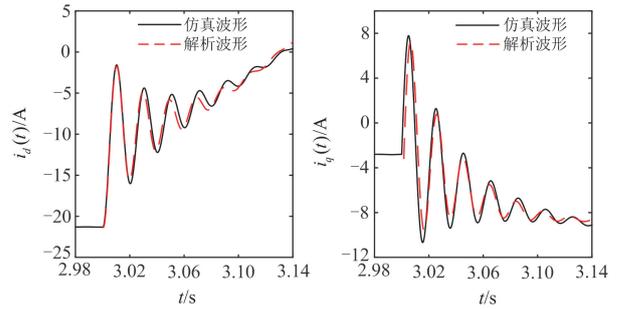


图 11 dq 轴电流波形

Fig. 11 dq axis current waveform

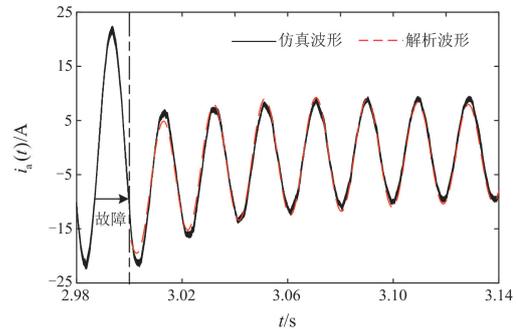


图 12 A 相电流波形

Fig. 12 A phase current waveform

#### 4.2 储能 VSG 故障特性验证(故障前为放电状态)

储能 VSG 故障前运行于放电状态, 故障后仍为放电状态。图 13 为电网电压跌落至 0.5 p.u. 时

$\Delta\omega(t)$  的变化波形, 根据图 13,  $\Delta\omega(t)$  的变化波形被划分为 4 个区间段, 每个区间段所对应的时间分别为  $\Delta t_1 \sim \Delta t_4$ , 经计算得  $\Delta t_1$  为 0.12 s。

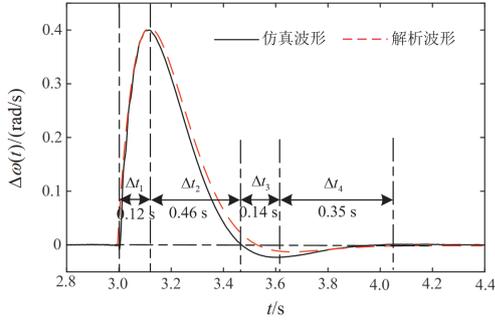


图 13 角频率变化量波形

Fig. 13 Waveform of angular frequency variation

由式(14)计算得图 13 中第一区间段内一次函数的斜率  $k'$  为 4.5694。基于该结果展开验证,  $u_{dq}(t)$ 、 $E_{ref}$ 、 $i_{dq}(t)$  和  $i_a(t)$  解析波形和仿真波形的对比结果分别如图 14—图 17 所示。

根据图 14, 放电状态下内电势超前于电网电压,  $u_q(t)$  为负数。故障后,  $u_d(t)$  和  $u_q(t)$  均跌落至原来的 50%, 随后  $u_q(t)$  逐渐下降, 这是由于有功-频率环输出角速度大于额定角速度, 功角的逐渐增

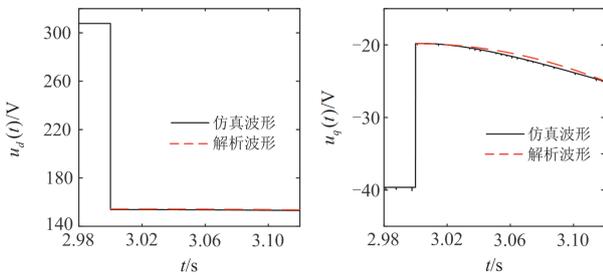


图 14 dq 轴电压波形

Fig. 14 dq axis voltage waveform

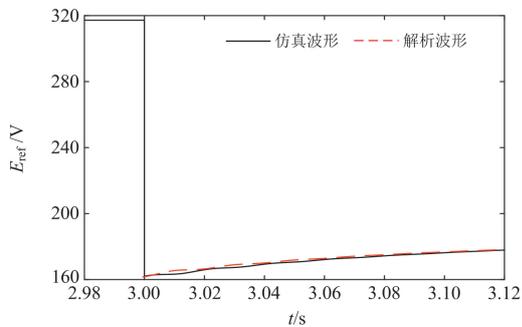


图 15 内电势波形

Fig. 15 Internal electric potential waveform

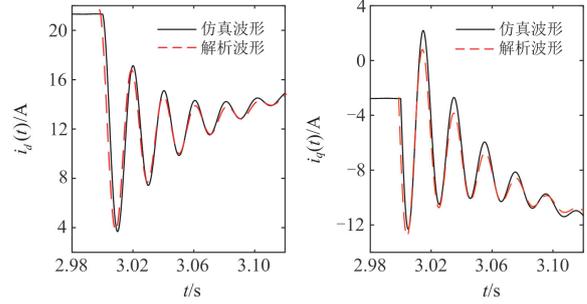


图 16 dq 轴电流波形

Fig. 16 dq axis current waveform

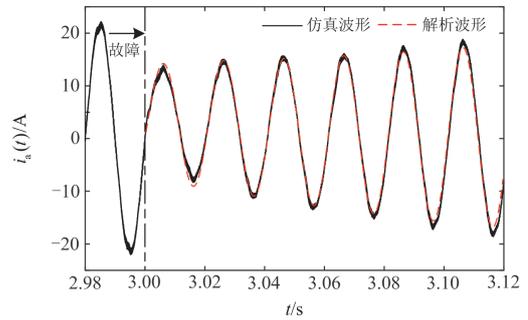


图 17 A 相电流波形

Fig. 17 A phase current waveform

大使  $u_q(t)$  呈现数值增大的变化特征。此外, 仿真波形和解析波形的验证效果良好, 证明了本文所建立  $u_{dq}(t)$  表达式的正确性。

功率流向的差异使得充放电不同运行状态下内电势大小不同: 放电状态下内电势的数值(图 15)比充电状态下(图 10)大。同时, 故障前后均为放电状态使图 16 中  $i_d(t)$  故障前后数值均为正。而故障前后相同的无功参考值使得图 11 和图 16 中  $i_q(t)$  的变化过程较为相似, 数值逐渐增大。由图 17 可知, A 相短路电流在故障后呈现波动程度较大的特点。此外, 图 15—图 17 中仿真波形和解析波形吻合效果良好, 验证了本文所建立  $E_{ref}$ 、 $i_{dq}(t)$  和  $i_a(t)$  解析表达式的正确性。

#### 4.3 所提解析方法与传统解析方法对比

传统储能 VSG 故障特性解析方法忽略有功-频率环动态特性, 认为故障后角频率不变<sup>[19]</sup>, 其所对应 A 相电流解析式如式(33)所示。

$$i_a = m_{a0} \sin(\omega t + \theta_{a0}) + m_{a2} \sin(\omega t + \theta_{a1}) \cdot e^{-t/\tau_1} + m_{a3} \sin(2\omega t + \theta_{a2}) e^{-t/\tau_v} + m_{a1} e^{-t/\tau_v} \quad (33)$$

式中,  $m_{a0}$ — $m_{a3}$ 、 $\theta_{a0}$ — $\theta_{a2}$  和  $\tau_v$ 、 $\tau_1$  分别为表征短路电流幅值、相位和衰减时间常数的量, 具体含义及推导过程详见文献[19]。

图 18 以 A 相短路电流为例, 分别给出电网电压跌落至 0.4 p.u. 时本文所提方法和传统方法所对应解析波形与仿真波形的对比图, 故障前储能 VSG 运行在放电状态。如图 18 所示, 随着故障时间的增加, 角频率的变化对短路电流的影响逐渐增加, 传统解析方法已不能准确描述短路电流暂态特征, 而本文所提方法对应的解析波形与仿真波形基本一致。

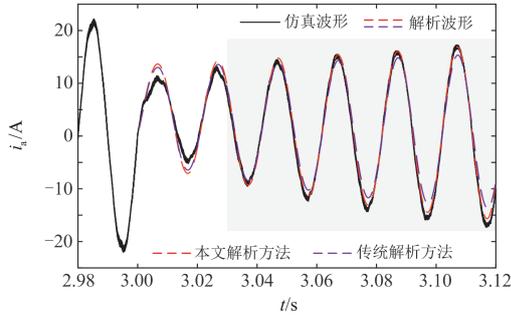


图 18 A 相电流波形 ( $U = 0.4$  p.u.)

Fig. 18 A phase current waveform ( $U = 0.4$  p.u.)

为进一步说明本文所提解析方法的准确性, 选取图 18 中角频率变化对短路电流影响较大的 90 ms, 将本文所提方法、传统方法所对应解析波形与仿真波形的误差进行对比分析。将 90 ms 等距分为 30 个离散时间点分别计算各电流量的瞬时误差<sup>[26]</sup>, 误差计算结果如图 19 所示。

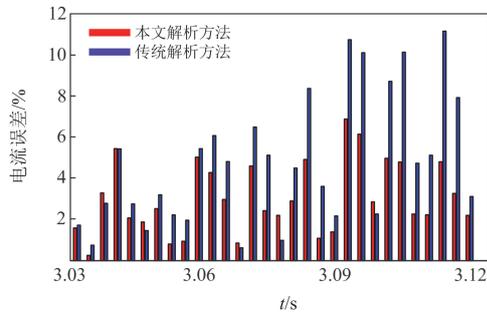


图 19 计算误差对比图 ( $U = 0.4$  p.u.)

Fig. 19 Comparison diagram of calculation errors ( $U = 0.4$  p.u.)

由图 19 可知, 有功-频率环动态特性对短路电流变化特征的影响与故障持续时间有关。随着故障持续时间的增加, 传统解析方法的误差百分数逐渐增加。而本文所提解析方法则可以准确刻画有功-频率环动态特性影响下短路电流暂态特征。

## 5 结论

储能 VSG 技术是保障新型电力系统频率和电压稳定的重要举措, 而有功-频率环动态特性对储能 VSG 故障特性的影响机理尚不明确。本文提出一种

计及有功-频率环动态特性影响的储能 VSG 故障特性解析方法, 所提方法可以准确描述储能 VSG 在不同运行状态及运行状态快速切换时电压电流等电气量故障暂态特征。通过本文分析得出以下结论。

1) 传统解析方法忽略有功-频率环动态特性, 以故障后角频率和两相旋转坐标系下电网电压恒定为前提建立短路电流的解析表达式, 难以保证解析精度。为此, 本文在考虑有功-频率环动态特性影响下角频率和电网电压非线性变化特征的基础上建立短路电流的解析表达式。

2) 故障时功率的变化使有功-频率环输出角频率呈非线性变化特征, 角频率的变化通过坐标变换使电网电压呈现复杂的变化特征。基于等面积原则的方法对角频率的变化进行简化处理, 可在保证解析精度的同时降低计算的复杂性。

3) 在明晰电网电压变化特征的基础上, 根据有功-频率环动态特性对储能 VSG 短路电流的影响路径, 通过综合考虑无功-电压环和虚拟阻抗环的动态响应可建立短路电流的解析表达式。经分析, 储能 VSG 短路电流中谐波含量较多, 除一种稳态工频分量外, 还包括 6 种暂态分量。

本文针对三相对称短路场景研究有功-频率环动态特性影响下储能 VSG 电气量故障暂态特征。不对称短路场景下陷波器和正负序分离环节的动态特性将使储能 VSG 的故障特征更加复杂, 后续将对此开展深入的研究分析。

## 附录 A1

$$\begin{cases} A_1(s) = \frac{L_v s + R_v}{(L_v s + R_v)^2 + \omega_N^2 L_v^2} & A_2(s) = \frac{\omega_N L_v}{(L_v s + R_v)^2 + \omega_N^2 L_v^2} \\ A_3(s) = \frac{L_v (L_v s + R_v)}{(L_v s + R_v)^2 + \omega_N^2 L_v^2} & A_4(s) = \frac{\omega_N L_v^2}{(L_v s + R_v)^2 + \omega_N^2 L_v^2} \end{cases}$$

$$|Z_v| = \sqrt{R_v^2 + (\omega_N L_v)^2} \quad \varphi_v = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_N L_v}{R_v} \right)$$

$$\tau_v = \frac{R_v}{L_v} \quad \theta' = \arctan \left( \frac{\tau_v (\tau_v^2 - 3\omega_N^2)}{\omega_N (\omega_N^2 - 3\tau_v^2)} \right)$$

$$\begin{cases} A_1 = -\frac{2U \sqrt{\omega_N^2 (\omega_N^2 - 3\tau_v^2)^2 + \tau_v^2 (\tau_v^2 - 3\omega_N^2)^2}}{L_v (\tau_v^2 + \omega_N^2)^3} \\ B_1 = \frac{U (\tau_v^2 + \omega_N^2)^2 [\tau_v \sin \delta_0 - \omega_N \cos \delta_0]}{L_v (\tau_v^2 + \omega_N^2)^3} \\ C_1 = \frac{U [2 \sin \delta_0 (\omega_N^4 - \tau_v^4) + 4 \tau_v \omega_N (\tau_v^2 + \omega_N^2) \cos \delta_0]}{L_v (\tau_v^2 + \omega_N^2)^3} \\ D_1 = \frac{-A_1 \cos(\theta' - \delta)}{(\tau_v^2 + \omega_N^2)^3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_2 = -A_1 \\ B_2 = -\frac{U(\tau_v^2 + \omega_N^2)^2 [\tau_v \cos \delta_0 + \omega_N \sin \delta_0]}{L_v(\tau_v^2 + \omega_N^2)^3} \\ C_2 = -\frac{U[2 \cos \delta_0 (\omega_N^4 - \tau_v^4) - 4\tau_v \omega_N (\tau_v^2 + \omega_N^2) \sin \delta_0]}{L_v(\tau_v^2 + \omega_N^2)^3} \\ D_2 = -\frac{A_2 \sin(\theta' - \delta_0)}{(\tau_v^2 + \omega_N^2)^3} \end{cases}$$

## 附录 A2

$$\begin{cases} \begin{cases} B'_1 = B_1 \sin \delta_0 - B_2 \cos \delta_0 \\ B'_2 = B_1 \cos \delta_0 + B_2 \sin \delta_0 \\ C'_1 = C_1 \sin \delta_0 - C_2 \cos \delta_0 \\ C'_2 = C_1 \cos \delta_0 + C_2 \sin \delta_0 \\ D'_1 = D_1 \sin \delta_0 - D_2 \cos \delta_0 \\ D'_2 = D_1 \cos \delta_0 + D_2 \sin \delta_0 \end{cases} \\ \begin{cases} q_4 = -\frac{3UK}{2} k^2 B'_2 & q_3 = -\frac{3UK}{2} k^2 C'_2 \\ q_2 = -\frac{3UK}{2} (k^2 D'_2 + kB'_1 - \frac{kU \cos \varphi_v}{|Z_v|}) \\ q_1 = -\frac{3UK}{2} kC'_1 & q_0 = -\frac{3UK}{2} kD'_1 \\ q_4(t) = q_4 t^4 + q_3 t^3 + q_2 t^2 + q_1 t + q_0 t \end{cases} \\ \begin{cases} a_1 = \frac{3KU}{2|Z_v|} \sin(\delta_0 + \varphi_v) \\ a_2 = KQ_{\text{ref}} + \frac{3KU^2}{2|Z_v|} \sin \varphi_v \end{cases} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \left( \frac{(U_0 - U) \sin \delta_0}{(U_0 - U) \cos \delta_0 - U_0 + U} \right) \\ \theta_2 = \arctan \left( \frac{\omega_N}{\tau_v - a_1} \right) \\ \theta_3 = \arctan \left( \frac{\omega^2 - (\tau_v - a_1)^2}{2\omega_N (\tau_v - a_1)} \right) \\ \theta_4 = \arctan \left( \frac{\omega_N (\omega_N^2 - 3(\tau_v - a_1)^2)}{(\tau_v - a_1)(3\omega_N^2 - (\tau_v - a_1)^2)} \right) \end{cases}$$

$$h_1 = \sqrt{((U_0 - U) \cos \delta_0 - U_0 + U)^2 + ((U_0 - U) \sin \delta_0)^2}$$

$$h_2 = -\frac{3UK}{2} \sqrt{\left( \frac{h_1}{|Z_v|} \cos(\varphi_v + \theta_1) + kA_1 \cos \theta' \right)^2 + \left( \frac{h_1}{|Z_v|} \sin(\varphi_v + \theta_1) + kA_1 \sin \theta' \right)^2}$$

$$\theta_{h_2} = \arctan \left( \frac{\frac{h_1}{|Z_v|} \sin(\varphi_v + \theta_1) + kA_1 \sin \theta'}{\frac{h_1}{|Z_v|} \cos(\varphi_v + \theta_1) + kA_1 \cos \theta'} \right)$$

## 附录 A3

$$\begin{cases} M = \frac{1}{\sqrt{(\tau_v - a_1)^2 + \omega_N^2}} \\ A_3 = \frac{1}{\sqrt{(\cos \theta_2 - 2kM^2 \sin \theta_4)^2 + (\sin \theta_2 + 2kM^2 \cos \theta_4)^2}} \\ \theta_{A_3} = \arctan \left( \frac{\sin \theta_2 + 2kM^2 \cos \theta_4}{\cos \theta_2 - 2kM^2 \sin \theta_4} \right) \\ A_4 = \frac{A_3 M}{|Z_v|} \\ \begin{cases} \theta'_1 = \varphi_v + \theta_{h_2} + \theta_{A_3} \\ \theta'_2 = \varphi_v + \theta_{h_2} + \theta_2 \\ \theta'_3 = \varphi_v + \theta_{h_2} + \theta_3 \end{cases} \\ \begin{cases} N(t) = N_4 t^4 + N_3 t^3 + N_2 t^2 + N_1 t + N_0 \\ N_4 = \frac{q_4}{a_1} & N_3 = \frac{q_3}{a_1} - \frac{4q_4}{a_1^2} \\ N_2 = \frac{q_2}{a_1} - \frac{3q_3}{a_1^2} + \frac{12q_4}{a_1^3} \\ N_1 = \frac{q_1}{a_1} - \frac{2q_2}{a_1^2} + \frac{6q_3}{a_1^3} - \frac{12q_4}{a_1^4} \\ N_0 = \frac{q_0}{a_1} - \frac{q_1}{a_1^2} + \frac{2q_2}{a_1^3} - \frac{6q_3}{a_1^4} + \frac{24q_4}{a_1^5} \end{cases} \end{cases}$$

## 附录 A4

$$\begin{cases} \tau_1 = \tau_v + a_1 \\ \begin{cases} n_{d0} = \frac{a_2 \cos \varphi_v}{a_1 |Z_v|} - \frac{U}{|Z_v|} \cos(\varphi_v - \delta_0) \\ n_{d1} = \frac{C \cos \varphi_v}{|Z_v|} \\ n_{d2} = -\frac{A_4}{2|Z_v|} \sin(\theta' - \varphi_v) \end{cases} \end{cases}$$

$$n_{d3} = \sqrt{\left( \left( \frac{E_0}{|Z_v|} - \frac{a_2}{a_1 |Z_v|} \right) \cos \varphi_v + \frac{U - U_0}{|Z_v|} \cos(\varphi_v - \delta_0) + kA_1 \cos(\theta' - \delta_0) + \frac{A_4}{|Z_v|} \cos \varphi_v \sin \theta' \right)^2 + \left( \left( \frac{E_0}{|Z_v|} - \frac{a_2}{a_1 |Z_v|} \right) \sin \varphi_v + \frac{U - U_0}{|Z_v|} \sin(\varphi_v - \delta_0) + kA_1 \sin(\theta' - \delta_0) - \frac{A_4}{|Z_v|} \cos \varphi_v \cos \theta' \right)^2}$$

$$\begin{cases}
n_{d4} = -\frac{C}{|Z_v|} \\
n_{d5} = -\frac{A_4}{2|Z_v|} \\
\theta_{d3} = \arctan \left( \frac{\left( \left( \frac{E_0}{|Z_v|} - \frac{a_2}{a_1|Z_v|} \right) \sin \varphi_v + \frac{U-U_0}{|Z_v|} \sin(\varphi_v - \delta_0) + kA_1 \sin(\theta' - \delta_0) - \frac{A_4}{|Z_v|} \cos \varphi_v \cos \theta' \right)}{\left( \left( \frac{E_0}{|Z_v|} - \frac{a_2}{a_1|Z_v|} \right) \cos \varphi_v + \frac{U-U_0}{|Z_v|} \cos(\varphi_v - \delta_0) + kA_1 \cos(\theta' - \delta_0) + \frac{A_4}{|Z_v|} \cos \varphi_v \sin \theta' \right)} \right) \\
\theta_{d4} = \varphi_v \\
\theta_{d5} = \frac{\pi}{2} - (\varphi_v + \theta'_1) \\
n_{q0} = \frac{U}{|Z_v|} \sin(\varphi_v - \delta_0) - \frac{a_2 \sin \varphi_v}{a_1 |Z_v|} \\
n_{q1} = -\frac{C \sin \varphi_v}{|Z_v|} \\
n_{q2} = \frac{A_4}{2|Z_v|} \cos(\theta' - \varphi_v) \\
n_{q3} = \left( \left( \left( \frac{a_2}{a_1|Z_v|} - \frac{E_0}{|Z_v|} \right) \cos \varphi_v - \frac{U-U_0}{|Z_v|} \cos(\varphi_v - \delta_0) + kA_2 \cos(\theta' - \delta_0) - \frac{A_4}{|Z_v|} \sin \varphi_v \cos \theta' \right)^2 + \left( \left( \frac{a_2}{a_1|Z_v|} - \frac{E_0}{|Z_v|} \right) \sin \varphi_v - \frac{U-U_0}{|Z_v|} \sin(\varphi_v - \delta_0) + kA_2 \sin(\theta' - \delta_0) - \frac{A_4}{|Z_v|} \sin \varphi_v \sin \theta' \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\
n_{q4} = \frac{C}{|Z_v|} \\
n_{q5} = -\frac{A_4}{2|Z_v|} \\
\theta_{q3} = \arctan \left( \frac{\left( \left( \frac{a_2}{a_1|Z_v|} - \frac{E_0}{|Z_v|} \right) \sin \varphi_v - \frac{U-U_0}{|Z_v|} \sin(\varphi_v - \delta_0) + kA_2 \sin(\theta' - \delta_0) - \frac{A_4}{|Z_v|} \sin \varphi_v \sin \theta' \right)}{\left( \left( \frac{a_2}{a_1|Z_v|} - \frac{E_0}{|Z_v|} \right) \cos \varphi_v - \frac{U-U_0}{|Z_v|} \cos(\varphi_v - \delta_0) + kA_2 \cos(\theta' - \delta_0) - \frac{A_4}{|Z_v|} \sin \varphi_v \cos \theta' \right)} \right) \\
\theta_{q4} = \varphi_v \\
\theta_{q5} = \frac{\pi}{2} - (\varphi_v + \theta'_1)
\end{cases}$$

## 附录 A5

$$\begin{cases}
n_{a0} = \sqrt{n_{d0}^2 + n_{q0}^2} & \theta_{a0} = \theta_0 + \arctan \left( \frac{n_{q0}}{n_{d0}} \right) \\
n_{a1} = \sqrt{n_{d1}^2 + n_{q1}^2} & \theta_{a1} = \theta_0 + \arctan \left( \frac{n_{q1}}{n_{d1}} \right) \\
n_{a2} = \sqrt{n_{d2}^2 + n_{q2}^2} & \theta_{a2} = \theta_0 + \arctan \left( \frac{n_{q2}}{n_{d2}} \right) \\
n_{a3} = \frac{\sqrt{(n_{d3} \cos \theta_{d3} + n_{q3} \cos \theta_{q3})^2 + (n_{d3} \sin \theta_{d3} + n_{q3} \sin \theta_{q3})^2}}{2} \\
\theta_{a3} = \theta_0 + \arctan \left( \frac{n_{d3} \sin \theta_{d3} + n_{q3} \sin \theta_{q3}}{n_{d3} \cos \theta_{d3} + n_{q3} \cos \theta_{q3}} \right) \\
n_{a4} = n_{d4} \\
n_{a5} = n_{d5} & \theta_{a4} = \theta_0 + \theta_{d4} \\
n_{a6} = \frac{n_{d3} \cos(\theta_{d3} - \theta_0) - n_{q3} \cos(\theta_{q3} - \theta_0)}{2}
\end{cases}$$

## 参考文献

- [1] 陈萌, 赵谔, 王亚林, 等. 大规模电化学储能系统故障监测与诊断研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8086-8102.  
CHEN Meng, ZHAO Su, WANG Yalin, et al. Review on fault monitoring and diagnosis of large-scale electrochemical energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8086-8102.
- [2] 薛福, 马晓明, 游焰军. 储能技术类型及其应用发展综述[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 48-58.  
XUE Fu, MA Xiaoming, YOU Yanjun. Energy storage technologies and their applications and development[J]. Integrated Smart Energy, 2023, 45(9): 48-58.
- [3] 李立, 王佳明, 张青蕾, 等. 兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 125-135.  
LI Li, WANG Jiaming, ZHANG Qinglei, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 125-135.
- [4] ALEH S A, OZKOP E, VALDES M E, et al. On the factors affecting battery unit contributions to fault currents in grid-connected battery storage systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 3019-3028.
- [5] 毛志宇, 李培强, 肖家杰, 等. 面向风功率波动平抑的电池储能双层协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6494-6507.  
MAO Zhiyu, LI Peiqiang, XIAO Jiajie, et al. Research on coordinated two-layer control strategy of battery energy storage for wind power fluctuate mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6494-6507.

- [6] 高良春. 微电网故障特征分析与保护原理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [7] 张家琪, 刘朋印, 谢小荣, 等. 适用于故障特性分析的锂离子电池储能电磁暂态建模方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 166-173.  
ZHANG Jiaqi, LIU Pengyin, XIE Xiaorong, et al. Electromagnetic transient modeling method of lithium-ion battery energy storage system for fault characteristic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 166-173.
- [8] BAK Y, LEE J S, LEE K B. A low voltage ride through control strategy for energy storage systems[C] // 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA: 1-6.
- [9] 石荣亮, 兰才华, 王国斌, 等. 基于有功前馈补偿的储能 VSG 并网有功振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 118-126.  
SHI Rongliang, LAN Caihua, WANG Guobin, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 118-126.
- [10] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 22-31.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 22-31.
- [11] 杨欢红, 严灵杰, 黄文焘, 等. 考虑功率最大输出与储能协调的光储 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 64-73.  
YANG Huanhong, YAN Lingjie, HUANG Wentao, et al. VSG control strategy for a photovoltaic system with storage considering maximum power output and energy storage coordination[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 64-73.
- [12] 石荣亮, 张群英, 王国斌, 等. 提高储能 VSG 并网有功响应性能的暂态阻尼策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 134-140.  
SHI Rongliang, ZHANG Qunying, WANG Guobin, et al. Transient damping strategies to improve grid-connected active response performance of energy storage VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 134-140.
- [13] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [14] 许诤翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3595.  
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [15] SHUAI Zhikang, HUANG Wen, SHEN Chao, et al. Characteristics and restraining method of fast transient inrush fault currents in synchronverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7487-7497.
- [16] 赵慧敏. 下垂控制逆变器并联系统故障特性分析与控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [17] 刘航, 王跃, 刘永慧, 等. 基于定量设计虚拟阻抗的 VSG 低电压穿越策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 245-256.  
LIU Hang, WANG Yue, LIU Yonghui, et al. The LVRT strategy for VSG based on the quantitatively designed virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 245-256.
- [18] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-412.  
SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-412.
- [19] 郑涛, 王子鸣, 邹芃葢, 等. 电网对称短路故障时虚拟同步机电流解析计算及影响因素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1460-1475.  
ZHENG Tao, WANG Ziming, ZOU Pengying, et al. Fault current calculation and influencing factors analysis of virtual synchronous generator under symmetrical short circuit fault[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1460-1475.
- [20] 江世明, 唐杰. 基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 144-154.  
JIANG Shiming, TANG Jie. Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 144-154.
- [21] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274-4285.  
PAN Zixun, YANG Xiaofeng, ZHAO Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285.
- [22] 张舒鹏. 电池储能参与调频的控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [23] 郑涛, 邹芃葢, 王子鸣. 计及锁相环动态响应特性的光伏并网系统故障电流解析计算[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4656-4667.  
ZHENG Tao, ZOU Pengying, WANG Ziming. Fault current analysis of photovoltaic grid-connected system considering dynamic response characteristics of PLL[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4656-4667.
- [24] 唐欣, 蔡明君, 唐惟楚, 等. 辐射型直流配电网母线电压跌落峰值的定量计算方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3108-3116.  
TANG Xin, CAI Mingjun, TANG Weichu, et al. Quantitative calculation method of bus voltage sag peak value in radial DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3108-3116.
- [25] 张元林. 工程数学积分变换[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-10-29

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhengtao\_sf@126.com

马英(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统继电保护。E-mail: 482711997@qq.com

(编辑 魏小丽)