

# 离相封闭母线振动机理与响应研究

赵盛杰<sup>1</sup>, 钱君霞<sup>1</sup>, 宋鹏程<sup>1</sup>, 王家镇<sup>2\*</sup>, 冯安涛<sup>2</sup>, 王缪锐<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏 南京

<sup>2</sup>南京师范大学, 电气与自动化工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2021年11月4日; 录用日期: 2021年12月22日; 发布日期: 2021年12月29日

## 摘要

针对离相封闭母线振动易引起的安全隐患, 本文拟开展其振动机理与响应仿真分析。以水平布置的全连式离相封闭母线为例, 建立动力学模型, 分析短路故障时和地震作用下的母线振动响应机理, 并进行仿真和对比分析。分析结果验证了母线确实存在振动, 且振动强度带来的危害不容忽视。该研究为母线振动分析与减振研究提供理论依据。

## 关键词

离相封闭母线, 动力学模型, 短路电力, 振动

# Study on the Vibration Mechanism and Response of Isolated Phase Enclosed Bus

Shengjie Zhao<sup>1</sup>, Junxia Qian<sup>1</sup>, Pengcheng Song<sup>1</sup>, Jiazhen Wang<sup>2\*</sup>, Antao Feng<sup>2</sup>, Miaorui Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Keneng Electric Power Engineering Consulting, Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

Received: Nov. 4<sup>th</sup>, 2021; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In view of the potential safety hazards easily caused by the vibration of isolated phase enclosed bus, the vibration mechanism and response simulation analysis will be carried out in the paper. Taking the fully connected isolated phase enclosed bus with horizontal arrangement as an example, the dynamic

\*通讯作者。

model is established. The mechanisms of bus vibration response under short-circuit fault and earthquake are analyzed, and simulation and comparative analysis are carried out. The results of the analyses verify that the bus vibration does exist, and the harm caused by vibration intensity can not be ignored. This study provides a theoretical basis of bus vibration analysis and vibration reduction.

## Keywords

Isolated Phase Enclosed Bus, Dynamic Model, Short-Circuit Electrodynamics Force, Vibration

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全连式三相离相封闭母线是由外壳、导体、绝缘支撑材料及有关附件组成的三相分箱式结构的母线，被广泛应用于 50 MW 及以上的发电机引出线回路和厂用分支回路中[1]，可有效减少相间和接地故障，并减少周围钢结构发热[2]。

然而母线在运行过程中时常伴有振动和噪声的现象，由于长期处在不同数值的大电流下运行，经过短路电流冲击，受到外部振动扰动，其外壳、导体、支撑绝缘子、金具等在过大的振动下极易出现局部变形、松动、脱落等机械损伤，外壳长期的振动反过来作用于支撑绝缘子和母线时，极易造成实际检修过程中发现的支撑绝缘子松动、脱落甚至断裂问题，造成不可逆的设备及线路损坏[3]。关于封闭母线的振动分析，一般考虑导体及外壳是受到电动力的作用，通常分析当电流密度达到最大值、母线导体相间距离达到最小值时，封闭母线受到的电动力，目前主要基于解析法和有限元法分析电动力引起的振动[4]，而在母线实际运行过程中还会受到外部的激励产生振动。

因此，本文在建立了水平布置的离相封闭母线集中参数的二维剖面动力学模型基础上，研究短路电动力及地震作用下的母线振动响应，为后续减振设计研究工作提供理论基础。

## 2. 离相封闭母线结构参数与模型建立

离相封闭母线结构是将各相母线导体采用绝缘子与外壳相支持并封闭于各相的外壳之中，外壳本身相互连通，且在首末端用短路版将三相外壳短接，构成三相外壳回路[5]，如图 1 所示。本文以 QZFM-15/14000 型号离相封闭母线为例，其额定电压为 15.75 kV、额定电流为 14000 A、导体半径为 265 mm、导体厚度为 16 mm、外壳半径为 490 mm、外壳厚度为 10 mm、相间距离为 1200~1400 mm。

三相离相封闭母线的一般排列方式为三根管型外壳在同一平面内相互平行，由于母线基本为同轴圆柱，而短路电动力的计算量又比较大[6]，为简化模型，建立集中参数的剖面动力学模型，如图 1(b)所示，其运动方程为：

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + (k_1 + k_2)(x_1 - x_2) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 - (c_1 + c_2)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - (k_1 + k_2)(x_1 - x_2) + k_5(x_2 - q) + c_5(\dot{x}_2 - \dot{q}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_3 + (c_3 + c_4)(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + (k_3 + k_4)(x_3 - x_4) = F_{dt} \\ m_2 \ddot{x}_4 - (c_3 + c_4)(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - (k_3 + k_4)(x_3 - x_4) = F_{wk} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $m_1$  为母线导体质量， $m_2$  为母线外壳质量， $c_1$ 、 $c_2$  为支撑绝缘子垂直方向等效阻尼系数， $k_1$ 、 $k_2$  为支撑绝缘子垂直方向等效刚度系数， $x_1$ 、 $x_2$  分别为母线导体及外壳在垂直方向上的位移， $c_3$ 、 $c_4$  为支撑绝缘子水平方向等效阻尼系数， $k_3$ 、 $k_4$  为支撑绝缘子水平方向等效刚度系数， $k_5$  为外壳下部钢架支撑的等效刚度系数， $c_5$  为钢架支撑的等效阻尼系数， $x_3$ 、 $x_4$  分别为母线导体及外壳在水平方向上的位移， $q$  为外部激励的位移输入、 $F_{dt}$  为导体受到的短路电动力、 $F_{wk}$  为外壳受到的短路电动力。

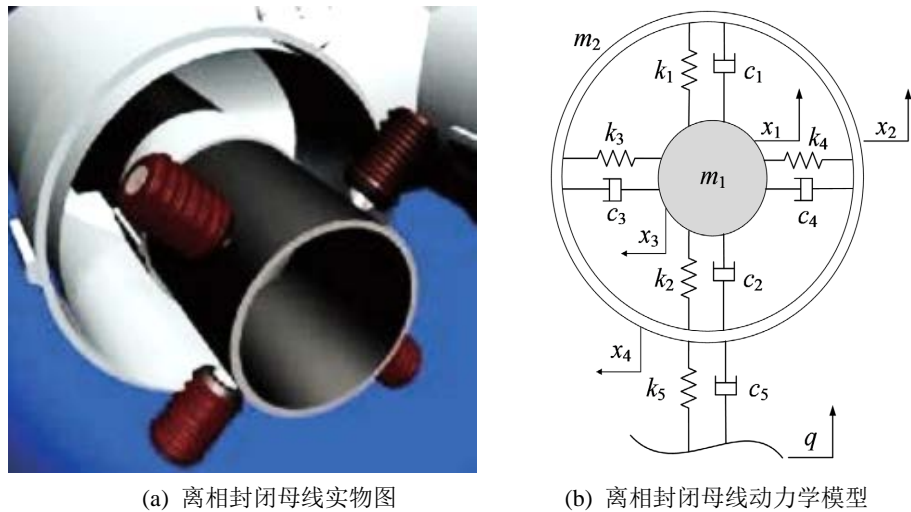


Figure 1. Structural diagram and dynamic model of IPEB  
图 1. 离相封闭母线结构示意图与动力学模型

### 3. 离相封闭母线振动机理

离相封闭母线振动主要来自于两个方面，一是外壳和导体处在负荷电流和外壳环流所产生的交变磁场中，在交变的电动力作用下产生电磁振动，尤其是发生短路故障时由于电流值较大，振动的幅值将急剧增大[7]；二是外部激励下而产生的振动，如抽水蓄能电站的水泵抽放水时，水流带来的冲击或当发生地震时母线也会产生振动。

#### 3.1. 电动力作用

##### 1) 外壳短路电动力

离相封闭母线流过三相短路电流时，基波外壳电动力密度为[8]：

$$v_{r1} = v_{r1(0)} + v_{r1(t)} \tag{3}$$

$$v_{r1(0)} = -\frac{\mu_0}{4\pi^2 R_k^2} \frac{I_m^2}{q} \frac{\tau_a}{(\tau_a - \tau_{R0})^2} \left[ -\frac{\tau_a (2 - \tau_{R0})}{\tau_a - 1} e^{-\frac{2t}{T_c}} - \frac{\tau_a - \tau_{R0}}{\tau_a - 1} \cdot \frac{2\tau_a - \tau_{R0}}{\tau_{R0} - 1} e^{-\frac{T_a + T_e}{T_a T_e} t} - \frac{\tau_a (2 - \tau_{R0})}{\tau_{R0} - 1} e^{-\frac{2}{T_{R0}} t} + \frac{\tau_a (\tau_a - \tau_{R0})}{(\tau_a - 1)(\tau_{R0} - 1)} e^{-\frac{T_{R0} + T_e}{T_{R0} T_e} t} + \left( \frac{2\tau_a - \tau_{R0}}{\tau_{R0} - 1} + \frac{\tau_a}{\tau_a - 1} - \tau_{R0} - \tau_a \right) e^{-\frac{T_a + T_{R0}}{T_a T_{R0}} t} \right] \cos \theta \tag{4}$$

$$v_{r1(t)} = -\frac{\mu_0}{4\pi^2 R_k^2} \frac{I_m^2}{q} \left[ ae^{-\frac{t}{T_d}} + (1-a) \right] \times \frac{\tau_a}{\tau_a - \tau_{R0}} \times \left[ \frac{\tau_a}{\tau_a - 1} e^{-\frac{t}{T_a}} - \frac{\tau_{R0}}{\tau_{R0} - 1} e^{-\frac{t}{T_{R0}}} + \frac{\tau_a - \tau_{R0}}{(\tau_a - 1)(\tau_{R0} - 1)} e^{-\frac{t}{T_e}} \right] \cos \omega t \cos \theta \quad (5)$$

其中  $q = \frac{S}{2R_k} + \sqrt{\left(\frac{S}{2R_k}\right)^2 - 1}$ ,  $T_a = 0.1 \text{ s}$ ,  $T_e = \frac{\mu_0 R_k C_k}{2\rho_k}$ ,  $T_{R0} = 2T_e \ln \frac{S}{R_k}$ ,  $\tau_a = \frac{T_a}{T_e}$ ,  $\tau_{R0} = \frac{T_{R0}}{T_e}$ , 外壳半径  $R_k = 0.49 \text{ m}$ , 外壳厚度  $C_k = 0.01 \text{ m}$ , 相间距离  $S = 1.2 \text{ m}$ ,  $\rho_k = 3.45 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^2/\text{m}$ , 短路电流峰值  $I_m = 14000 \times 6 \times \sqrt{2} = 118793.9 \text{ A}$ 。

单位长度外壳总电力为:

$$q_k = (v_{r1(0)} + v_{r1(t)}) \frac{\pi R_k}{\cos \theta} \quad (6)$$

2) 导体短路电力为:

$$q_{Bdt} = -\frac{\mu_0}{2\pi S} \frac{\sqrt{3}}{2} I_m^2 \frac{e^{-t/T_a} - e^{-t/T_e}}{1 - T_e/T_a} \left\{ \left[ ae^{-t/T_d} + (1-a) \right] \sin(\omega t - \varphi_B) - \sin \varphi_B e^{-t/T_a} \right\} \quad (7)$$

### 3.2. 外部扰动激励作用

以 Taft 地震波为例, 如式(8)所示, 地震加速度时程可用一个函数形式表示为:

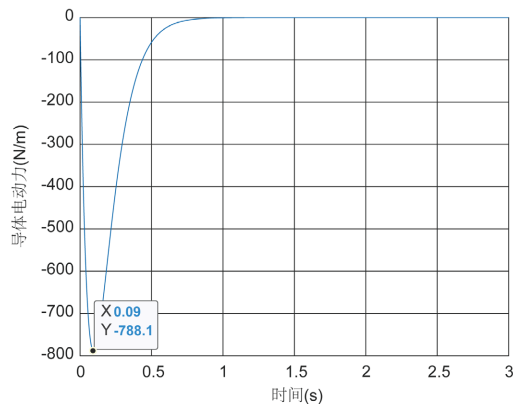
$$a(t) = f(A_{\max}, T_g, T_D, T_1) \quad (8)$$

式中  $A_{\max}$  为最大峰值加速度、 $T_g$  为规范反应谱特征周期、 $T_D$  为加速度时程持续时间、 $T_1$  为结构基本周期。

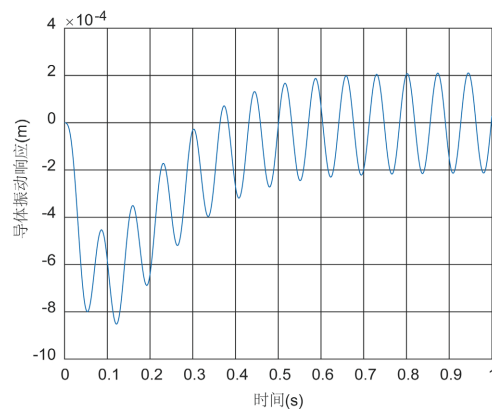
## 4. 离相封闭母线振动响应分析

### 4.1. 电力作用下振动响应

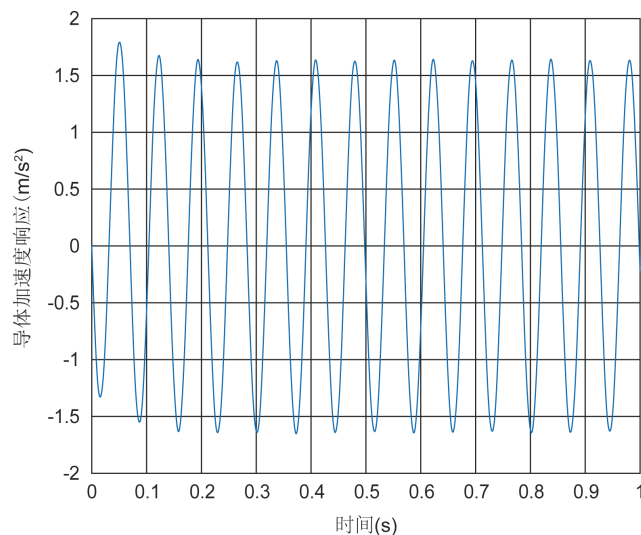
假设发生三相短路故障, 故障电流为 110000 A, 故障时间为 0~1 s, 分别观察导体与外壳受力和振动情况, 如图 2 所示。计算得到当  $t = 0.09 \text{ s}$  时, 导体受到最大的水平方向电力为 -788.1 N/m, 如图 2(a) 所示。母线导体的横向振动位移及振动加速度响应如图 2(b)、图 2(c) 所示, 可以看出, 短路电力导致母线导体会发生最大 0.8 mm 的位移, 稳定后的无阻尼振动位移峰峰值为 0.4 mm, 加速度稳定在峰峰值  $3.4 \text{ m/s}^2$ , 振动频率约为 12.5 Hz。



(a) 导体所受最大电力



(b) 导体位移响应



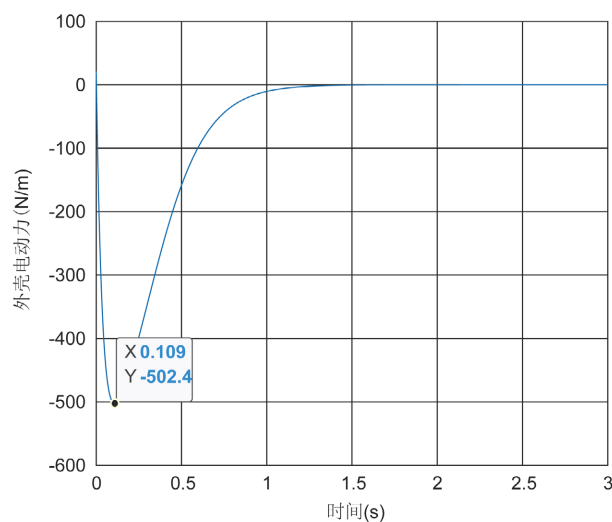
(c) 导体加速度响应

**Figure 2.** Stress and vibration of bus conductor under short-circuit electrodynamic force**图 2.** 短路电力作用下导体受力与振动情况

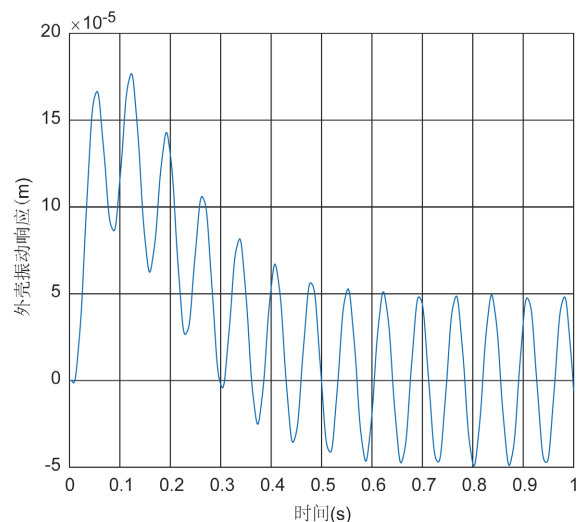
计算得到当  $t = 0.109$  s 时, 外壳受到最大的水平方向电力为  $-502.4$  N/m, 如图 3(a)所示, 母线外壳的振动响应及水平方向加速度响应如图 3(b)、图 3(c)所示, 可以看出, 当发生短路故障时, 母线外壳会发生横向最大  $0.175$  mm 的偏移, 稳定后的无阻尼振动位移峰值约为  $0.1$  mm, 振动加速度最大值约  $0.6$  m/s<sup>2</sup>, 振动频率成分丰富, 基频约为  $10$  Hz。

#### 4.2. 地震作用下振动响应

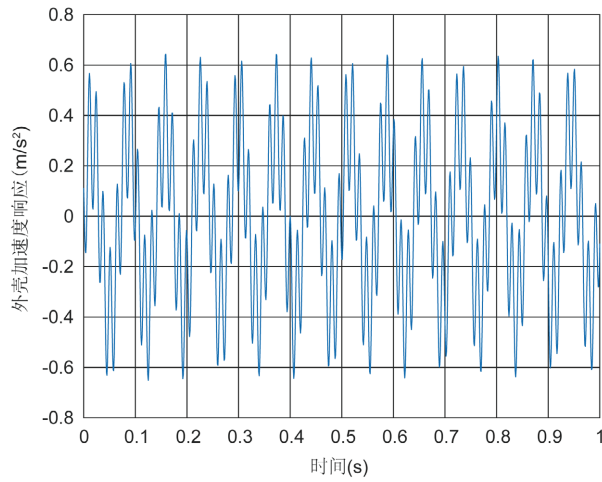
模拟 Taft 地震作用下, 母线导体及外壳的振动响应及加速度响应如图 4 所示。可以发现当  $t = 0.1$  s 时, 导体位移达到  $0.8$  mm, 并以  $13$  m/s<sup>2</sup> 的加速度幅值振动; 外壳位移达到  $0.6$  mm, 并保持  $9$  m/s<sup>2</sup> 的加速度幅值振动。



(a) 外壳所受最大电力

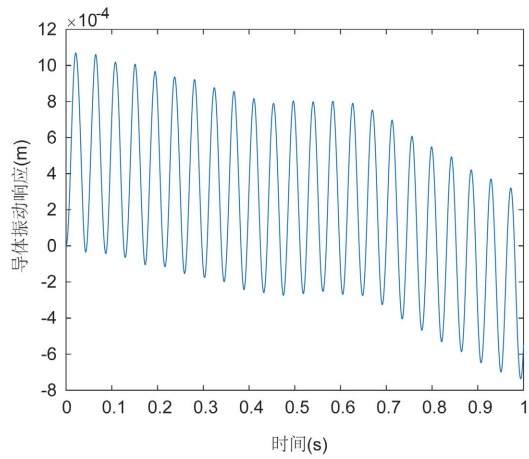


(b) 外壳位移响应

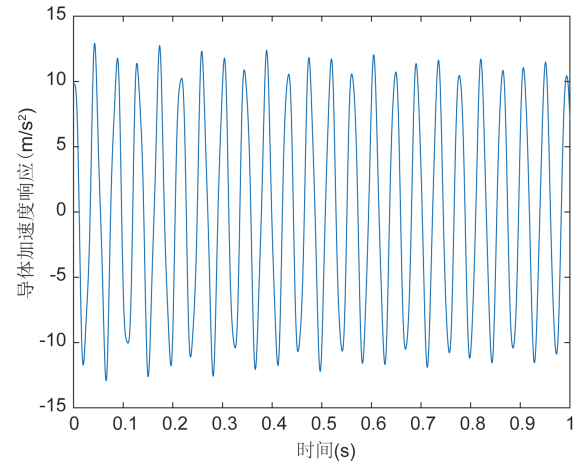


(c) 外壳加速度响应

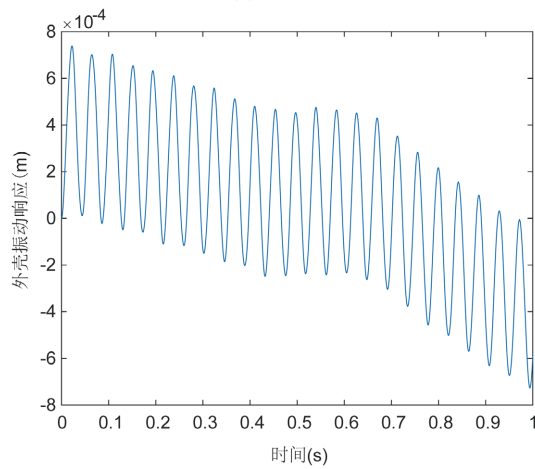
**Figure 3.** Stress and vibration situations of bus shell under short-circuit electrodynamic force  
**图 3.** 短路电力作用下外壳受力与振动情况



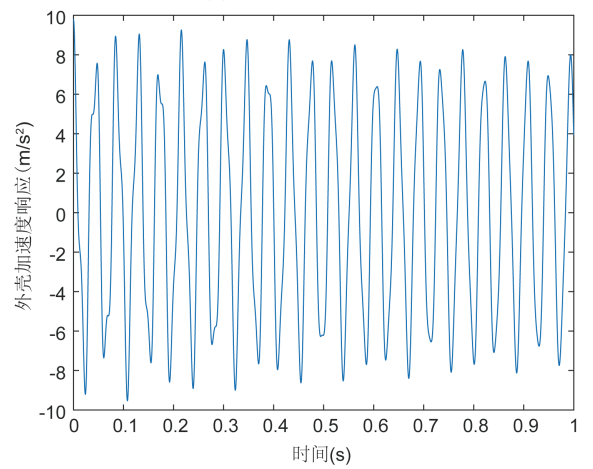
(a) 导体位移



(b) 导体加速度响应



(c) 外壳位移响应



(d) 外壳加速度响应

**Figure 4.** IPEB vibration situation under seismic shock  
**图 4.** 地震冲击下离相封闭母线振动情况

## 5. 结论

本文建立了水平布置的全连式离相封闭母线集中参数的二维剖面动力学模型,分别分析了短路电动力及地震作用下的母线振动响应。仿真结果表明,当短路发生时,受到水平电动力影响,母线导体和外壳均会发生持续无阻尼振动,尽管振动幅度较小,但长期的振动易导致结构件松动,造成安全隐患。而在地震冲击作用下,母线导体和外壳发生持续无阻尼振动的幅度较短路电动力下显著增大,极有可能造成母线结构性破坏,影响供电系统安全运行。

## 致 谢

感谢南京师范大学电气与自动化工程学院振动控制实验室提供理论分析与仿真技术支持。

## 参考文献

- [1] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 1-2
- [2] 孙锦波. 全绝缘封闭母线振动特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2015.
- [3] 张烈, 胡婷婷. 浅谈共箱封闭母线振动问题[C]//中国水力发电工程学会电气专业委员会. 2012 年电气学术交流会议论文集: 2012 年卷. 成都: 2012: 190-193.
- [4] 李博, 梁慧敏, 由佳欣, 王寒诺, 包龙卿. 离相封闭母线动-热稳定性分段联合仿真分析方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3631-3639.
- [5] 靳孝义, 刘玉东, 李英豪. 离相封闭母线分段支撑断裂的原因分析及改进措施[J]. 焊接技术, 2020, 49(6): 107-110+6.
- [6] 仲留寄, 王金娥. 基于 Comsol 的离相封闭母线短路电动力的计算[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(3): 22-25+48.
- [7] 严兆军, 吴军. 大容量离相封闭母线轴向电焊与电动力分析[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 78-86.
- [8] 郭健. 离相封闭母线场域分析及仿真软件开发[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2005.