

## 负荷模型对电力系统失步振荡特性的影响

马伟哲, 程维杰, 张仕鹏, 许琴

引用本文:

马伟哲, 程维杰, 张仕鹏, 等. 负荷模型对电力系统失步振荡特性的影响[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 110-114.

MA Weizhe, CHENG Weijie, ZHANG Shipeng, et al. Influence of Load Model to Out-of-step Oscillation Characteristics of Power System[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 110-114.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 广东电网失步解列策略研究

Tactics Study on Step Splitting of Guangdong Power Grid

南方能源建设. 2016, 3(2): 32-35 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.006>

#### 基于不敏卡尔曼粒子滤波的动态电力负荷在线建模

On-line Dynamic Electric Load Modeling Based on Unscented Kalman Particle Filter

南方能源建设. 2017, 4(2): 51-57 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.008>

#### 贵州典型行业及用户负荷特性分析

Analysis on Power Load Characteristics of Guizhou Representative Consumers

南方能源建设. 2020, 7(z1): 29-35 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.006>

#### 贵州电网负荷特性影响因素分析

Analysis of Influence Factors of Load Characteristics in Guizhou

南方能源建设. 2020, 7(z1): 36-41 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.007>

#### 基于SA-PSO的风电消纳经济性动态规划分析

Research on Dynamic Economic Dispatch of Grid-connected Wind Power Based on SA-PSO Algorithm

南方能源建设. 2019, 6(3): 92-97 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.016>

# 负荷模型对电力系统失步振荡特性的影响

马伟哲<sup>1</sup>, 程维杰<sup>1</sup>, 张仕鹏<sup>2</sup>, 许琴<sup>2,✉</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 负荷作为最终消耗有功功率的部分, 对系统的稳定起着十分重要的影响, 为此, 文章研究不同负荷模型对电力系统失步振荡特性的影响。[方法] 以某大型电网区域断面为研究对象, 采用中国电力科学研究院的BPA程序, 综合分析不同负荷模型对振荡中心及失步解列装置动作的影响。[结果] 结果表明: 采用ZIP静态负荷模型, 线路 $U\cos\varphi$ 曲线周期完整性最好; 随着感应电动机类型负荷的占比增加,  $U\cos\varphi$ 曲线周期完整性变差, 甚至导致失步解列装置能否动作的结论发生颠覆性变化; 另外, 不同负荷模型也会导致振荡中心发生迁移。[结论] 因此, 采用最反映实际情况的负荷模型才能有效保证仿真结果的可信度。

**关键词:** 负荷模型; 失步振荡; 振荡中心; 失步解列装置

中图分类号: TM7; TM712

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)01-0110-05

开放科学(资源服务)二维码:



## Influence of Load Model to Out-of-step Oscillation Characteristics of Power System

MA Weizhe<sup>1</sup>, CHENG Weijie<sup>1</sup>, ZHANG Shipeng<sup>2</sup>, XU Qin<sup>2,✉</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] Load, as the part that ultimately consumes active power, has a very important impact on the stability of the system. Therefore, the influence of different load models on out-of-step oscillation characteristics of power system is studied in this paper. [Method] This paper took a large grid's regional discontinuity as the research target to comprehensively analyze the effects of different load models on the oscillation center and action of out of step splitting device using BPA program developed by China Electric Power Research Institute. [Result] The simulation results show when using the ZIP static load model, the line  $U\cos\varphi$  curve demonstrates the best periodic integrity, as the proportion of induction motor type load increases, the  $U\cos\varphi$  curve's periodic integrity becomes worse, it even leads to a subversive change in the conclusion whether the out of step splitting device can react. In addition, different load models also cause the oscillation center migration. [Conclusion] Therefore, the credibility of simulation results can only be guaranteed by using the most realistic load model.

**Key words:** load model; out-of-step oscillation; oscillation center; out of step splitting device

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

电力系统由发电机、输电网络和负荷终端等主要元件组成<sup>[1]</sup>。负荷作为最终消耗有功功率的部分, 对系统的稳定起着十分重要的影响<sup>[2]</sup>。前期的大量研究表明, 不同的负荷模型对系统功角稳定、

电压稳定、频率稳定均有不同的影响, 甚至会产生颠覆性的变化<sup>[3-4]</sup>。

目前, 国内失步解列装置中的失步判别原理主要有3种:  $U\cos\varphi$ 法、相位角法、循序阻抗法<sup>[5-8]</sup>。三种判据的数学表达式均与站点电压及电压、电流的相位角有关, 另外, 振荡中心的位置变化也与两侧电压幅值有关。因此, 从理论角度分析, 负荷模

收稿日期: 2020-06-11 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“电力系统安全稳定控制技术及应用”(EX05511W)

型对系统的失步振荡特性同样也具有重要影响。

为此, 本文以某大型电网为研究对象, 采用中国电力科学研究院的 BPA 程序, 开展仿真分析计算。重点从不同负荷模型对振荡中心的位置及失步解列装置的动作情况方面来分析对系统失步振荡特性的影响程度。

## 1 负荷模型的介绍

负荷模型一般分为静态负荷模型、动态负荷模型及综合负荷模型<sup>[9-12]</sup>。

### 1.1 静态负荷模型(ZIP)

静态负荷模型通常采用恒定阻抗、恒定电流和恒定功率的线性组合来表示。某些时候, 为了分析负荷的频率特性, 在 ZIP 模型之中, 可以加入一个频率因子。ZIP 静态负荷模型如式 (1):

$$\begin{cases} P = P_0 \left[ a_p \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + b_p \left( \frac{U}{U_0} \right) + c_p \right] \left( 1 + \frac{dp}{df} \Big|_{f_0} \Delta f \right) \\ Q = Q_0 \left[ a_q \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + b_q \left( \frac{U}{U_0} \right) + c_q \right] \left( 1 + \frac{dq}{df} \Big|_{f_0} \Delta f \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_0$  为有功功率初始值 (MW);  $Q_0$  为无功功率初始值 (MW); 电压二次项相当于恒定阻抗负荷, 电压一次项相当于恒定电流负荷 ( $I$ ), 电压零次项相当于恒定功率负荷 ( $P$ ),  $1 + \frac{dp}{df} \Big|_{f_0} \Delta f$  为负荷的频率特性。

### 1.2 动态负荷模型

动态负荷模型结构由非机理式和机理式两大类。机理式均是以感应电动机模型为基础, 有三阶机电暂态模型和一阶机械暂态模型等, 其中三阶模型能较好的反映感应电动机动态特性。

### 1.3 综合负荷模型

采用三阶感应电动机并联负荷静态特性的综合负荷模型结构, 是目前最常用的模型。通过设置不同的占比, 产生不同的负荷模型。如华东电网采用的 60% 感应电动机并联 40% 恒阻抗、南方电网采用的 50% 感应电动机并联 50% 恒阻抗等。

## 2 算例仿真分析

### 2.1 仿真网络

以某大型电网 500 kV 主网架为例, 如图 1 所示。选取直流 1+直流 2 双极闭锁稳控拒动和 XLS 站

三相故障主保护拒动出线全失 2 个故障作为算例, 重点研究对断面 1 的振荡中心特性及失步解列装置动作情况的影响。其中, 直流 1+直流 2 双极闭锁稳控拒动故障导致大量潮流迂回到交流断面上, 引起区域断面 1 失步振荡; XLS 站三相故障主保护拒动出线失压导致断面 1 的一个通道断开, 引起断面其他通道失步振荡。失步解列装置动作判据采用  $U \cos \varphi$  轨迹法。主要算例采用 3 种负荷模型: (1) 综合负荷模型: 50% III 型马达+50% 恒阻抗模型; (2) 静态 30% 恒阻抗+40% 恒电流+30% 恒功率模型, 简称静态 3-4-3ZIP 模型; (3) 70% III 型马达+30% 恒阻抗模型。马达参数为: 定子电阻  $R_s$  0.02, 定子电抗  $X_s$  0.18, 激磁电抗  $X_m$  3.5, 转子电阻  $R_r$  0.02, 转子电抗  $X_r$  0.12, 惯性时间常数  $T_J$  2。

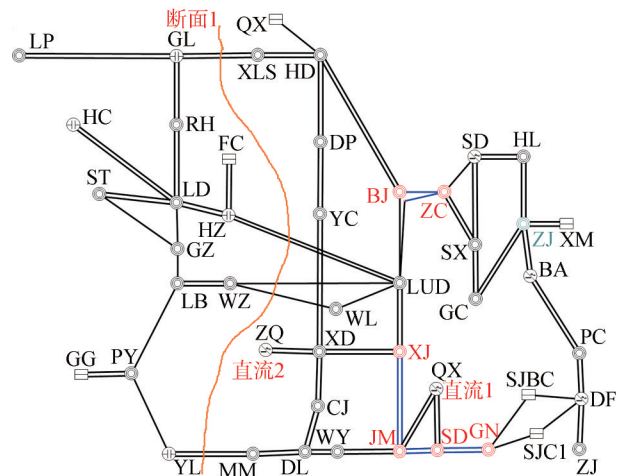


图 1 某大型电网 500 kV 主网架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 500 kV main grid frame of a large grid

### 2.2 对振荡中心的影响

以直流 1+直流 2 双极闭锁稳控拒动故障为例, 经仿真分析, 采用不同的负荷模型, 振荡中心均位于断面 1 附近 (GL-XLS 线、LD-HZ 线、HZ-LUD 线、LB-WZ 线及 YL-MM 线), 不同之处是在 HZ-LUD 通道上, 采用不同的负荷模型振荡中心的位置有所不同, 详见图 2。由图 2 可知, 采用 ZIP 模型时, 振荡中心在 HZ-LUD 线上; 采用 50% III 型马达+50% 恒阻抗模型时, 振荡中心前 2 周期在 HZ-LUD 线后迁移至 LD-HZ 线; 采用 70% III 型马达+30% 恒阻抗模型时, 振荡中心主要在 HZ-LUD 线上。总之, 负荷模型的不同将影响振荡中心的迁移变化。

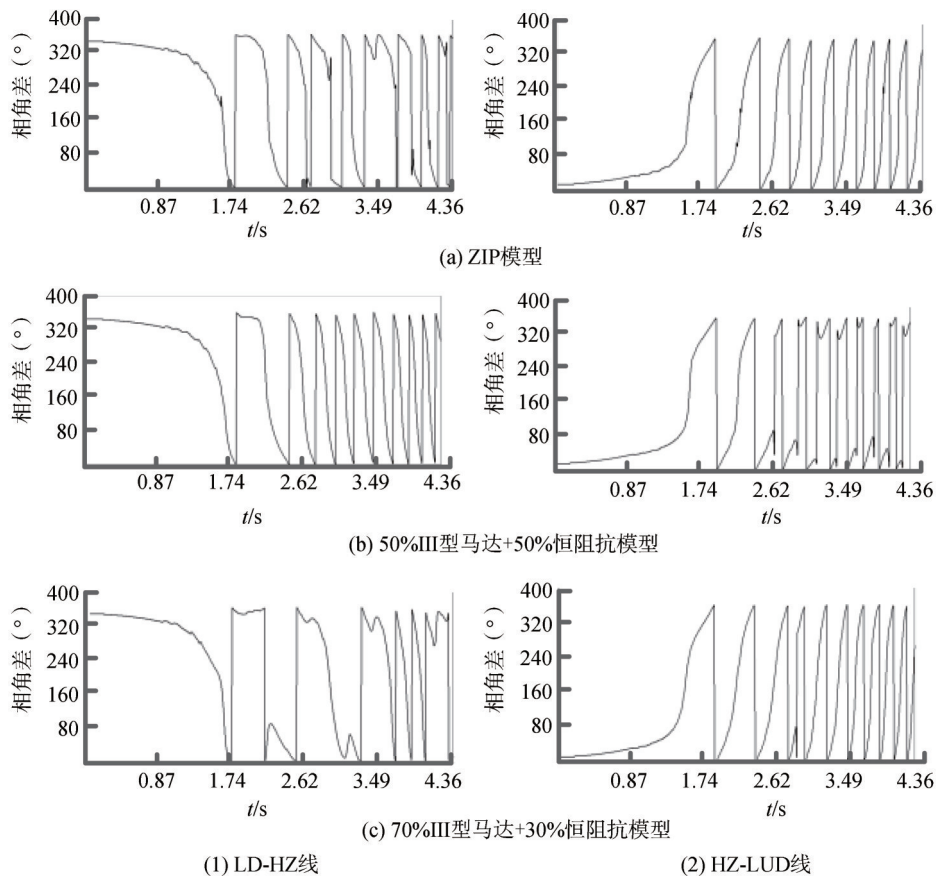


图2 LD-HZ线和HZ-LUD线的两侧相角差曲线  
 Fig. 2 Phase difference curve of both sides of the LD-HZ and HZ-LUD lines

其主要原因是由于负荷模型的不同，将导致线路两侧的电压幅值差值不等，从而影响到振荡中心的位置。

2.3 对失步解列装置动作的影响

以直流1+直流2双极闭锁稳控拒动故障时GL-XLS线XLS侧、HZ-LUD线HZ侧、WZ-LUD线WZ侧、YL-MM线MM侧 $U\cos\varphi$ 曲线为例进行分析。由图3可知，采用ZIP静态负荷模型，线路 $U\cos\varphi$ 曲线周期完整性最好，两广断面所有线路均能正确判出并解列断面；但随着感应电动机类型负荷的占比增加， $U\cos\varphi$ 曲线周期完整性变差，甚至会导致失步解列装置能否动作的结论发生颠覆性变化。如WZ-LUD线WZ侧 $U\cos\varphi$ 曲线，采用ZIP负荷模型，第二周期幅值范围为 $[-1, 1]$ ，采用70%III型马达+30%恒阻抗模型，第二周期 $U\cos\varphi$ 幅值范围为 $[-0.26, 0.42]$ 。根据装置的逻辑判别原理， $U\cos\varphi$ 幅值从大于0.3的值穿越到小于-0.3，才算完成一个周期，因此，存在采用70%III型马达+30%

恒阻抗模型时，周期定值整定为2时，WZ侧失步解列装置不能解开WZ-LUD线的情况。

以XLS站三相故障主保护拒动出线全失时LUD-WZ线LUD侧 $U\cos\varphi$ 曲线为例进行分析。由图4可知，采用ZIP静态负荷模型，线路 $U\cos\varphi$ 曲线周期完整性最好，但随着感应电动机类型负荷的占比增加， $U\cos\varphi$ 曲线周期完整性变差。与直流1+直流2双极闭锁稳控拒动故障算例结论一致。

其主要原因是因为故障恢复阶段马达电磁转矩减小，但机械功率依然保持在较高的水平，随着马达逐渐减小，滑差在短时间内逐渐拉大，马达将从系统内吸收大量无功，导致系统电压降低，所以 $U\cos\varphi$ 曲线的周期完整性差；而ZIP负荷吸收的无功功率与电压同方向变化，在故障后的恢复期间会随着系统电压的下降而下降，在一定程度上缓解了系统的无功缺额，有利于电压的恢复，所以 $U\cos\varphi$ 的周期完整性较好。

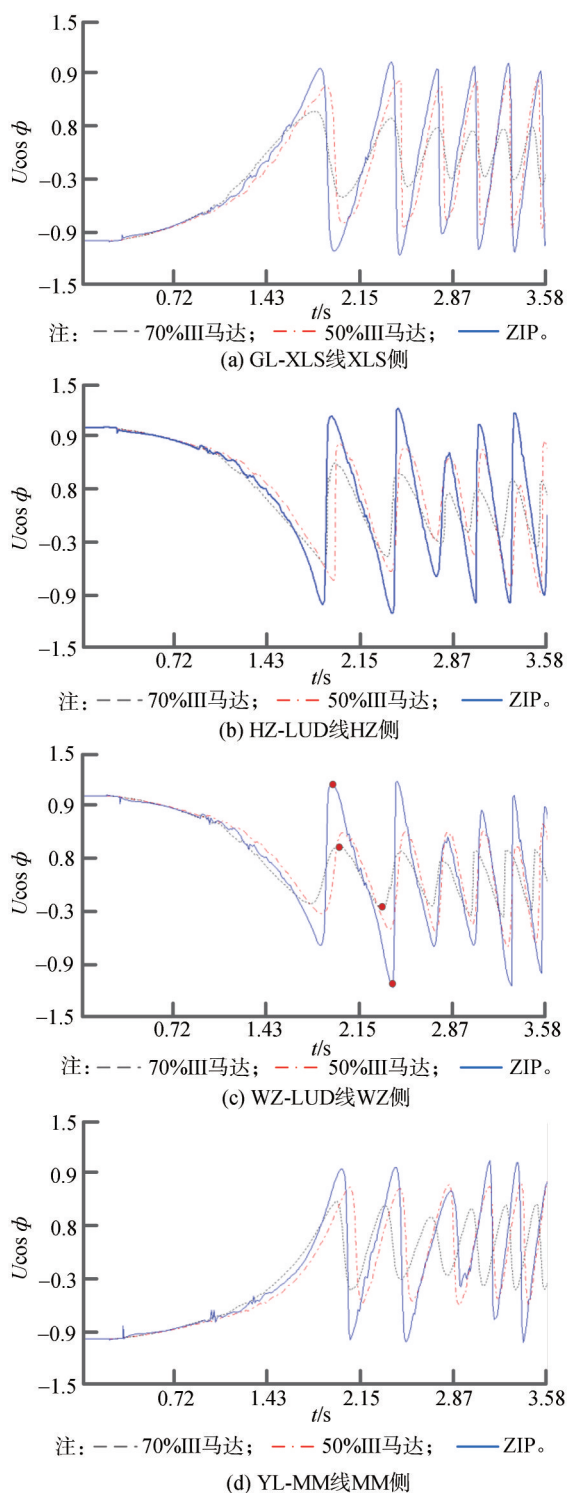


图 3 直流 1+直流 2 双极闭锁稳控拒动故障时 GL-XLS 线 XLS 侧、HZ-LUD 线 HZ 侧、WZ-LUD 线 WZ 侧、YL-MM 线 MM 侧  $U\cos\phi$  曲线

Fig. 3  $U\cos\phi$  curve of XLS side of GL-XLS Line, HZ side of HZ-LUD Line, WZ side of WZ-LUD Line, MM side of YL-MM Line when DC1+DC2 bipolar blocking failure that stability control device refused to move

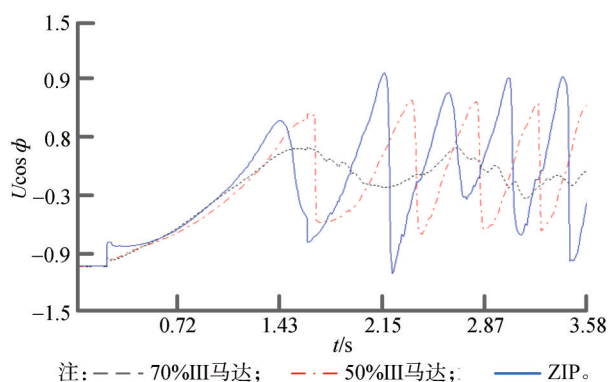


图 4 XLS 站三相故障主保护拒动出线全失时 LUD-WZ 线 LUD 侧  $U\cos\phi$  曲线

Fig. 4  $U\cos\phi$  curve of LUD side of LUD-WZ Line when XLS station three-phase failure, main protection refusing to operate and failure of all outgoing lines happened

### 3 结 论

负荷作为电力系统的一个重要组成部分, 其模型和参数选择与实际负荷的吻合程度对电力系统相应的失步振荡特性分析结论具有重要影响。

不同模型结构对系统失步振荡特性分析影响很大。以对失步解列装置动作情况的影响为例, 采用 ZIP 静态负荷模型, 线路  $U\cos\phi$  曲线周期完整性最好; 随着感应电动机类型负荷的占比增加,  $U\cos\phi$  曲线周期完整性变差, 甚至会导致失步解列装置能否动作的结论发生颠覆性变化。由仿真结果可知, 感应电动机模型所在比重越大, 分析结论越偏于保守, 甚至有可能是截然相反的。因此, 采用最反映实际情况的负荷模型才能有效保证仿真结果的可信度, 即不能过于乐观, 也不能过于保守。

#### 参考文献:

[1] 邹德旭, 贺仁睦, 司大军. 负荷模型对电力系统动态稳定的影响 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 118-122.  
ZOU D X, HE R M, SI D J. Effects of load model on dynamic stability in power system [J]. Proceedings of the CSU-EPISA, 2011, 23(1): 118-122.

[2] 应林志, 王建全. 负荷模型对特高压接入浙江电网暂态稳定分析的影响 [J]. 华东电力, 2011, 39(1): 0121-0124.  
YING L Z, WANG J Q. Impact of load model on transient stability analysis of connection of ultra-high voltage to Zhejiang grid [J]. East China Electric Power, 2011, 39(1): 0121-0124.

[3] 邱丽萍, 金小明, 林勇, 等. 负荷模型对电力系统仿真计算的影响 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 87-90.  
QIU L P, JIN X M, LIN Y, et al. Impact of load model in power system simulation [J]. Proceedings of the CSU-EPISA,

- 2014,26(11):87-90.
- [4] 赵静波,鞠平,施佳君,等. 电力系统负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):87-94.  
ZHAO J B, JU P, SHI J J, et al. Review and prospects for load modeling of power system [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 87-94.
- [5] 刘云. 巴西电网失步解列情况分析 & 启示[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1111-1121.  
LIU Y. Analysis on out-of-step separation in brazilian power grid and its inspiration [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1111-1121.
- [6] 汤涌. 基于响应的电力系统广域安全稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5041-5050.  
TANG Y. Response-based wide area control for power system security and stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5041-5050.
- [7] 丁剑, 马世英, 赵伟, 等. 大电网失步解列难点问题及隔离策略初步构想[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2394-2401.  
DING J, MA S Y, ZHAO W, et al. Difficulties and preliminary conception of isolation strategy on power grid out-of-step islanding [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2394-2401.
- [8] 王英涛, 汤涌, 丁理杰, 等. 新型电力系统失步广域控制技术研发[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1827-1833.  
WANG Y T, TANG Y, DING L J, et al. Research and development of new wide area out-of-step control technology for power systems [J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1827-1833.
- [9] 屈星, 李欣然, 宋军英, 等. 考虑配电网调压的综合负荷模型[J]. 电工技术学报, 2018(4): 759-770.  
QU X, LI X R, SONG J Y, et al. Composite load model considering voltage regulation of distribution network [J]. Guangdong Electric Power, 2018(4): 759-770.
- [10] 刘婷, 尚慧玉. 负荷模型对电网安全稳定计算分析的影响[J]. 电工技术, 2020(4): 123-124.  
LIU T, SHANG H Y. Influence of load model on calculation and analysis of power grid security and stability [J]. Electric Engineering, 2020(4): 123-124.
- [11] 刘媛杰, 李霞, 李云阳. 常用电力负荷模型的分析研究[J]. 塔里木大学学报, 2015, 27(4): 99-104.  
LIU Y J, LI X, LI Y Y. Analysis of commonly used power load model [J]. Journal of Tarim university, 2015, 27(4): 99-104.
- [12] 王若愚, 谢莹华. 深圳电网负荷分类及构成分析[J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 43-46.  
WANG R Y, XIE Y H. Analysis on Shenzhen grid load classification and composition [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 43-46.
- [13] 谢家安, 莫颖生, 王玉荣. COVID-19 重大疫情下的电网负荷趋势评估新方法[J]. 广东电力, 2020, 30(7): 42-48.  
XIE J A, MO Y S, WANG Y R. A new method for evaluating power load trends in major outbreaks of COVID-19 [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(7): 42-48.

#### 作者简介:



**马伟哲**

1982-, 男, 黑龙江哈尔滨人, 学士, 工程师, 主要研究方向为电网调度、规划及智能电网相关研究工作 (e-mail) mawei-zhe@sz. csg. cn。

**马伟哲**

#### 程维杰

1982-, 男, 河南开封人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制 (e-mail) chengweijie@sz. csg. cn。

#### 张仕鹏

1974-, 男, 四川巴中人, 专业级资深专家, 高级工程师, 东北师范大学粒子物理与原子核物理硕士, 华南理工大学能源与环保在读博士生, 主要从事电力系统自动化研究及设计 (e-mail) zhangshipeng@gedi. com. cn。

#### 许琴 (通信作者)

1987-, 女, 江西九江人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制 (e-mail) xuqin@gedi. com. cn。

(责任编辑 李辉)

## 广 告

珠海桂山海上风电场示范项目一期后续及二期工程首台风机成功并网发电 ..... 封二

国产化率最高的燃机热电联产项目全面建成投产 ..... 封三

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 ..... 封四