

中国电机工程学报  
*Proceedings of the CSEE*  
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

## 《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 基于斯皮尔曼相关系数和系统惯量的中国电网停电事故趋势预测  
作者: 于群, 霍筱东, 何剑, 李琳, 张建新, 冯煜尧  
网络首发日期: 2022-08-25  
引用格式: 于群, 霍筱东, 何剑, 李琳, 张建新, 冯煜尧. 基于斯皮尔曼相关系数和系统惯量的中国电网停电事故趋势预测[J/OL]. 中国电机工程学报.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220824.1625.012.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于斯皮尔曼相关系数和系统惯量的中国电网停电事故趋势预测

于群<sup>1</sup>, 霍筱东<sup>1</sup>, 何剑<sup>2</sup>, 李琳<sup>2</sup>, 张建新<sup>3</sup>, 冯煜尧<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东省 青岛市 266590;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192;

3. 国网上海市电力公司, 上海市 200122)

## Trend Prediction of Power Blackout Accidents in Chinese Power Grid Based on Spearman's Correlation Coefficient and System Inertia

YU Qun<sup>1</sup>, HUO Xiao-Dong<sup>1</sup>, HE Jian<sup>2</sup>, LI Lin<sup>2</sup>, ZHANG Jian-Xin<sup>3</sup>, FENG Yu-Yao<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong Province, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

**ABSTRACT:** In the context of the tight energy situation and green development, the scale of renewable energy power generation worldwide is constantly expanding. However, in recent years, several large-scale power blackout accidents occurred abroad show that the wide access of renewable energy brings new challenges to the safe operation of power system. At the same time, Chinese "3060" dual carbon target and the construction of renewable energy based new power system target put forward, the installed capacity of renewable energy in the power grid has developed rapidly, resulting in a decline in the power system inertia level, power grid operation risk level further increased. In order to better understand the relationship between power grid blackouts and inertia levels, this paper analyzes the correlation between the average annual power blackout loss load and system inertia constant in Chinese power grid. Firstly, based on Spearman's correlation coefficient, the correlation analysis between the absolute and relative values of the average annual power outage loss load of the Chinese power grid and the system inertia constant is carried out. Secondly, it analyzes the changes in the correlation between the average annual loss of power outage accident load of Chinese power grid and the system inertia constant over time. Then, at the macro level, it predicted the development trend of the average annual power outage loss load of Chinese power grid in the future.

**KEYWORDS:** power systems; blackout; constant of inertia; correlation; Spearman's correlation coefficient; trend prediction

**摘要:** 在能源形势紧张和绿色发展的背景下, 全球范围内的新能源发电规模在不断扩大。然而近年来国外发生的几起大规模停电事故说明了新能源的广泛接入给电力系统的安全运行带来了新的挑战。与此同时我国“3060”双碳目标和建设以新能源为主的新型电力系统目标的提出, 使得电网中新能源装机发展迅猛, 导致电力系统惯量水平下降, 电网运行的风险水平进一步提高。为更好地认识电网的停电事故和惯量水平之间的关系, 本文分析了中国电网年均停电事故损失负荷与系统惯性常数之间的相关性。首先, 基于斯皮尔曼相关系数对中国电网年均停电事故损失负荷绝对值和相对值与系统惯性常数进行相关性分析。其次, 分析了随着时间推移, 中国电网年均停电事故损失负荷与系统惯性常数两者相关性的变化情况。然后在宏观层面, 预测了中国电网未来年均停电事故损失负荷的发展趋势。

**基金项目:** 国家电网有限公司总部科技项目 (5100-202155482A-0-5-ZN): “基于总体国家安全观的大停电事件全链条演化机理与战略防御框架研究”。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202155482A-0-5-ZN): Research on Whole Chain Evolution Mechanism and Strategic Defense Framework of Blackout Events Based on Holistic View of National Security.

**关键词:** 电力系统; 停电事故; 惯性常数; 相关性; 斯皮尔曼相关系数; 趋势预测

## 0 引言

随着电力系统的高速高质量发展, 电力成了人们不可缺少的生活生产要素, 电力系统安全运行变得越

来越重要。但电网的大停电事故时有发生,如2005年“9·26”海南全省大停电、2008年冰雪灾害天气导致的南方电网大面积停电事故,国外的2006年西欧大停电事故、2012年印度大停电事故、2019年英国“8·9”大停电<sup>[1]</sup>。

为了对大停电事故进行分析,国内外专家运用自组织临界性理论、Manchester演化模型、复杂网络理论分析和协同原理的大停电预测模型等,作为研究电力系统整体状态与大停电关系的主要方法,获得了广泛的研究<sup>[2]</sup>。随着电力系统的发展,其结构越来越复杂,大停电事故的规律发生了变化,研究大停电事故的角度更加新颖、方法也更加丰富。

近年来,我国提出“3060”双碳目标;欧盟计划2030年实现32%的可再生能源占比;美国预测2050年实现36%可再生能源占比<sup>[3]</sup>。随着上述目标的提出,催生了电力行业以风电、光伏为代表的新能源飞速发展<sup>[4]</sup>,在有效的降低碳排放的同时,由于风光发电不同于同步发电机,需要电力电子器件参与并网,并且光伏没有与同步发电机类似转子的旋转物体,使得高比例接入风光发电的电力系统惯量水平降低。新型电力系统惯量不足所引发的电力系统安全问题逐渐明显,例如南澳“9·28”、英国“8·9”大停电为代表的大停电事故,最终证明其原因都是新能源大力发展,广泛接入导致的电力系统惯量不足,文献[5-6]以这两起大停电事故为代表来解读高比例新能源接入带来惯量水平降低的影响。

在研究电力系统停电事故相关性的方面,文献[7]研究了美国电网的停电规模和恢复时间之间的相关性。文献[8]研究了配电网发生的故障在时间尺度的长程相关性。文献[9]研究了广东电网停电事故间隔的长程相关性和自相似性。文献[10]研究了中国电网停电事故损失负荷序列的长时间尺度相关性。文献[11]考虑电网规模增大电网发展研究了停电损失负荷时间尺度上的自相关性,并未考虑电网结构的变化。结合电力系统惯量水平降低和停电事故相关性的研究令人思考随着电网的不断发展,其不断改变的惯量水平与电网事故具有怎样的相关性,能否可以预测惯量水平变化给事故预测做出建议。

本文以中国电网的停电事故损失负荷和系统广义惯量水平作为研究对象,分析了在电力系统发展中两者的相关性。基于中国电网停电事故损失负荷绝对值和相对值两种尺度,求得每年事故损失负荷数据的平均值,应用斯皮尔曼相关系数对年均停电事故损失负荷和系统惯性常数做出相关性判断、并对其相关程度做出度量,并对中国电网未来几年的年均停电事故损失负荷做出趋势预测。

## 1 电力系统停电事故损失负荷统计

以文献[12]数据为基础,通过整理国家能源局、国家电力调度中心发布的公告和国家电网公司安全监察部每年发行的该年安全事故报告<sup>[13-18]</sup>,本文收集了1990—2020年共31年中国电网停电事故的历史数据,这些事故包括了安全自动装置及继电保护装置异常引发的事故、一次设备引发的事故和极端天气引发的电力事故等。本文选取了有负荷损失记载的247次停电事故作为研究对象。由此,可以得到中国电网在1990—2020年的停电事故损失负荷序列,如图1所示。

文献[19]指出了电网规模扩大对停电事故规律产生影响,为了使分析结果更加符合电网实际,所以本文在研究相关性时极有必要考虑电网规模扩大的因素。采用文献[20]中采用损失负荷相对值的方法,即损失负荷与该地区当时装机总量之比来表现,各地区装机总量由中国电力企业联合会发布的中国电力统计年鉴查询得到。由此,可以得到中国电网在1990—2020年停电事故损失负荷相对值序列,如图2所示。

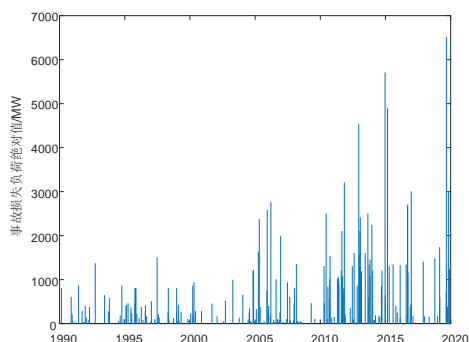


图1 中国电网1990—2020年事故损失负荷绝对值序列

Figure 1 Series of absolute value of accident loss load of Chinese Power Grid from 1990 to 2020

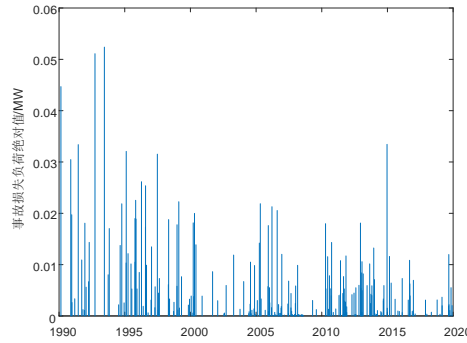


图 2 中国电网 1990—2020 年事故损失负荷相对值序列

Figure 2 Series of relative value of accident loss load of Chinese Power Grid from 1990 to 2020

对比图 1、图 2 可以得出：以 2005 年为界，2005 年之前中国电网停电事故损失负荷绝对值较小，其相对值较大；2005 年之后中国电网停电事故损失负荷绝对值变大，而其相对值变小。综上可得电网停电事故损失负荷绝对值和相对值的变化趋势不同，所以对两者都进行分析是必要的。

## 2 电力系统广义惯量的定义和变化趋势

惯性是物体保持运动状态不变的属性，惯量度量物体惯性的大小<sup>[21]</sup>。在电力系统中，惯性表现为对功率扰动的抵抗<sup>[22]</sup>，系统频率变化时，惯性能给予最迅速最直接的响应，因此维持足够的惯性对系统的稳定运行具有非常重要的意义。

### 2.1 电力系统广义惯量定义

系统的广义惯量定义为电力系统中能够反映系统惯性量值的统称，简称系统惯量，有系统广义动能和系统广义惯性常数等表达形式<sup>[22]</sup>，新型电力系统中新能源机组取代了部分的同步机组，两者提供惯量的方式不同，所以在新型电力系统惯量计算中考虑了新能源机组的作用，其计算方式同传统电力系统相同。系统广义动能表达式为：

$$E_{\text{sys}} = E_{\text{SG}} + E_{\text{IM}} + E_{\text{V(VS)}} + E_{\text{V(CS)}} + E_{\text{Load-U}} \quad (1)$$

式中， $E_{\text{SG}}$  为系统中同步机的动能， $E_{\text{IM}}$  为系统中异步电动机的动能， $E_{\text{V(VS)}}$  和  $E_{\text{V(CS)}}$  分别为电压型虚拟惯量和电流源虚拟惯量， $E_{\text{Load-U}}$  为静态负荷电压的等效惯量。

电力系统广义惯量水平的参考值是电力系统的广义惯性常数，下文将其简称为系统惯性常数。系统惯性常数定义为：

$$H_{\text{sys}} = E_{\text{sys}} / S_{\text{sys}} \quad (2)$$

式中， $S_{\text{sys}}$  为系统中总的额定发电容量。

### 2.2 我国电力系统广义惯量的变化趋势

新能源的加入，导致传统电力系统中同步机的占比减少，系统惯量水平发生改变，为了探究惯量水平的变化趋势，首先根据电力统计年鉴<sup>[23]</sup>提供的数据计算我国 1990—2020 年各类型能源装机比例。图 3 为 1990—2020 年各个类型装机的占比趋势。

在不考虑新能源发电系统提供虚拟惯量技术，仅考虑传统机组惯量形式的广义惯量情况下，按照新能源增加量与惯量减少量成正比变化进行惯量估算<sup>[24]</sup>，可得到：

$$H_{\text{sys}} = H_{\text{sys0}}(1 - k) \quad (3)$$

式中： $H_{\text{sys0}}$  为仅含同步机系统惯性常数； $H_{\text{sys}}$  为新能源比例为  $k$  时的系统惯性常数。

按保守估计，假定仅含同步机，无风电、光伏接入时系统惯性常数为  $4\text{s}$ <sup>[22]</sup>，按式(3)依次可以得到 1990 年至 2020 年各年的系统惯性常数，其变化趋势为图 4 所示。

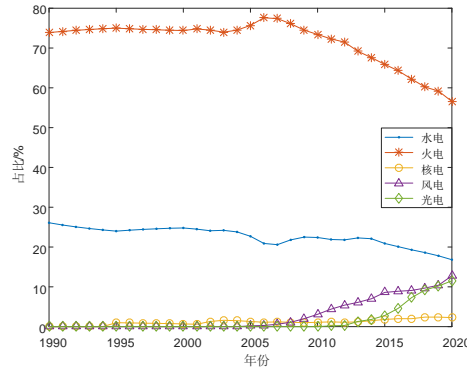


图 3 1990—2020 年中国各类型装机比重

Figure 3 Proportion of various types of installed capacity in China from 1990 to 2020

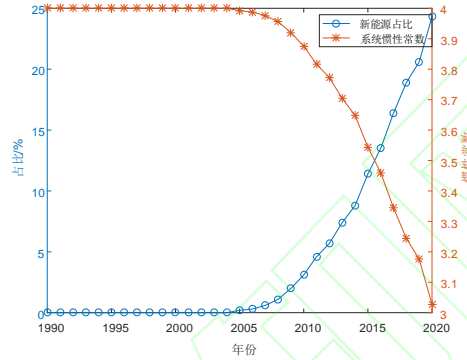


图 4 1990—2020 年中国电网系统惯性常数

Figure 4 Chinese power grid system inertia constant from 1990 to 2020

由图 3 和图 4 可以得出, 从 2005 年起新能源装机占比开始上升, 2005 年至 2010 年新能源占比从 0.2% 增长至 3.1%, 从 2010 年之后新能源装机占比增长迅速, 2010 年至 2015 年新能源占比从 3.1% 增长至 11.4%, 其对应的系统惯性常数明显减小, 所以带来的影响不可忽视。

由图 1 和图 2 可以得出, 中国电网事故损失负荷绝对值自 2005 年之后增大, 相对值自 2005 年之后减小, 又有 2005 年起新能源装机占比增长迅速, 系统惯性常数不断减小, 后文将详细分析惯性常数与中国电网事故损失负荷绝对值和相对值相关性方向及相关性强弱的问题。

### 3 电网停电事故损失负荷与系统惯性常数相关性分析方法

由文献[25]可知皮尔森相关系数和斯皮尔曼相关系数可以描述两组变量相关性。两者相比斯皮尔曼相关系数不需要数据服从正态分布, 所以在分析理论中, 斯皮尔曼相关系数的应用相对广泛。

斯皮尔曼相关系数是以 Charles Spearman 命名的相关系数, 用  $r_s$  表示, 是衡量两个变量的依赖性的非参数指标, 适用于其中一组变量为定序变量的情况。

#### 3.1 斯皮尔曼相关系数基本原理

$X$ 、 $Y$  为两组独立同分布的数据, 其元素个数均为  $N$ , 两组随机变量中取的第  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) 个值分别用  $X_i$ 、 $Y_i$  表示。对  $X$ 、 $Y$  同时进行降序或者升序排序, 得到两个元素排行集合  $x$ 、 $y$ , 其中元素  $x_i$ 、 $y_i$  分别为  $X_i$  在  $X$  中的排行以及  $Y_i$  在  $Y$  中的排行。集合  $x$ 、 $y$  中的对应元素的差值组成排行差分集合  $d$ , 其中  $d_i = x_i - y_i$ , ( $1 \leq i \leq N$ )。  $X$ 、 $Y$  之间的斯皮尔曼相关系数可以由  $x$ 、 $y$  或者  $d$  计算得到。  $r_s$  计算方式如下所示:

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

在实际应用中, 变量间的连结是无关紧要的, 于是可以由排行差分集合  $d$  计算得到:



$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (5)$$

斯皮尔曼相关系数的取值范围为： $[-1, 1]$ ， $r_s$  绝对值越大，相关性越强。斯皮尔曼相关系数  $r_s > 0$  时，认为讨论的两组变量存在正相关；斯皮尔曼相关系数  $r_s < 0$  时，则认为讨论的两组变量存在负相关。

### 3.2 斯皮尔曼相关系数的检验方法

本文将  $P$  值和临界值表用作斯皮尔曼相关系数的检验，当样本数目  $n > 30$  时，用  $P$  值确定，当样本数目  $n \leq 30$  时，用相关临界值确定。本文选择显著性水平为 0.01。

若总体相关系数  $\rho$  为 0，则  $r_s$  斯皮尔曼相关系数的分布可近似地用均值为 0，标准差为  $1/\sqrt{n-1}$  的正态分布曲线来表示<sup>[26]</sup>，经过数学变换可得到标准正态分布曲线，并得到正态检验值  $z$ ，过程如下：

$$r_s \sqrt{n-1} \sim N(0, 1) \quad (6)$$

$$z = r_s \sqrt{n-1} \quad (7)$$

通过正态检验值  $z$ ，可以通过正态分布密度函数求得双侧检验  $P$  值，通过比较  $P$  值与 0.01 之间的大小，可以判断  $r_s$  的显著性。当  $P$  小于 0.01 时，认为在显著性水平 0.01 下拒绝原假设，即两者具有相关性。

当样本数小于 30 时，查询该样本数所对应的斯皮尔曼相关系数临界值，当计算的斯皮尔曼相关系数大于该临界值时，认为两者之间相关性是显著的，是有统计学意义的。

## 4 中国电网停电事故和电力系统广义惯量水平相关性分析

### 4.1 中国电网年均停电事故损失负荷

首先对中国电网事故的损失负荷进行处理，因为系统惯性常数是以年为数据间距，所以本文选取同样是以年为间距的中国电网年均停电事故损失负荷作为我国每一年电网事故的年度参考量，其计算方法为：

$$P_{L-\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{L-i}}{n} \quad (8)$$

式中  $P_{L-\text{ave}}$  为电网年均停电事故损失负荷， $n$  为年事故次数， $P_{L-i}$  为该年中第  $i$  次事故的损失负荷幅值。

相对值处理方法同绝对值类似，由式(8)得：

$$P_{Lr-\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Lr-i}}{n} \quad (9)$$

式中  $P_{Lr-i}$  为电网年均停电事故损失负荷相对值， $P_{Lr-\text{ave}}$  为该年中第  $i$  次事故的损失负荷相对值。

通过上述公式(8-9)处理数据之后，运用 K-S 检验中国电网 1990—2020 年的年均停电事故损失负荷绝对值与相对值数据，其均值、标准差、偏度值、峰度值和 K-S 显著性参考值如表 1 所示。

表 1 中国电网年均停电事故损失负荷和绝对值和相对值的 K-S 检验结果

Table 1 The K-S test results of the average annual loss load and absolute value and relative value of power outage accidents in Chinese power grid

|     | 中国电网年均停电事故损失负荷绝对值 | 中国电网年均停电事故损失负荷相对值 |
|-----|-------------------|-------------------|
| 均值  | 606.64            | 0.007 4           |
| 标准差 | 437.14            | 0.005 5           |
| 偏度值 | 1.930             | 1.729             |

|           |         |       |
|-----------|---------|-------|
| 峰值值       | 3.822   | 3.133 |
| K-S 检验显著值 | 0.000 2 | 0.004 |

由表 1 可知, 两组数据均为非正态分布, 故皮尔森相关系数不适用。系统惯性常数可以视为等级定序变量来描述各年广义惯量水平, 年均停电事故损失负荷视为定距数据, 用斯皮尔曼相关系数分析两者相关性是可行且适合的, 可以计算斯皮尔曼相关系数和对应  $P$  值对两组数据的相关性方向做出判断, 对相关程度做出度量。

## 4.2 中国电网年均停电事故损失负荷与系统惯性常数的相关性分析

### 4.2.1 中国电网年均停电事故损失负荷绝对值与系统惯性常数的相关性分析

利用斯皮尔曼相关系数, 对 1990—2020 年中国电网年均停电事故损失负荷绝对值和系统惯性常数进行相关性分析, 由式(5)得到  $r_s = -0.895$ , 由式(7)得到检验统计值  $z = 4.6556$ , 由  $z$  和正态分布密度函数得到  $P = 3.230 4 \times 10^{-6}$ , 可以判断得  $P \ll 0.01$ , 可以得出计算得到的斯皮尔曼相关系数  $r_s$  是显著的。由斯皮尔曼相关系数定义可知, 两组变量之间具有较强的相关性, 且两者相关性方向为负, 并以  $r_s = -0.895$  作为该相关性的度量, 以  $P = 3.230 4 \times 10^{-6}$  作为两者之间相关性度量的显著性水平。

图 5 为惯性常数和电网年均停电事故损失负荷绝对值的散点图, 图 6 为惯性常数和年均停电事故损失负荷绝对值两者相关性分析的可视化结果, 分别为系统惯性常数分布情况、两者的斯皮尔曼相关系数及显著性、两者相关性的趋势和年均停电事故损失负荷绝对值分布情况。

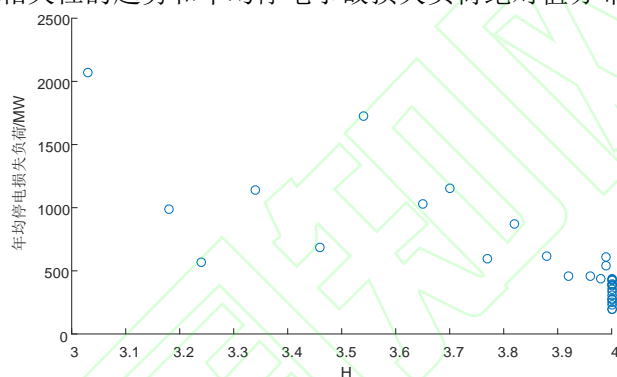


图 5 中国电网年均停电事故损失负荷绝对值与系统惯性常数散点图

Figure 5 Scatter diagram of the absolute value of the average annual power outage accident loss load of Chinese power grid and the system inertia constant

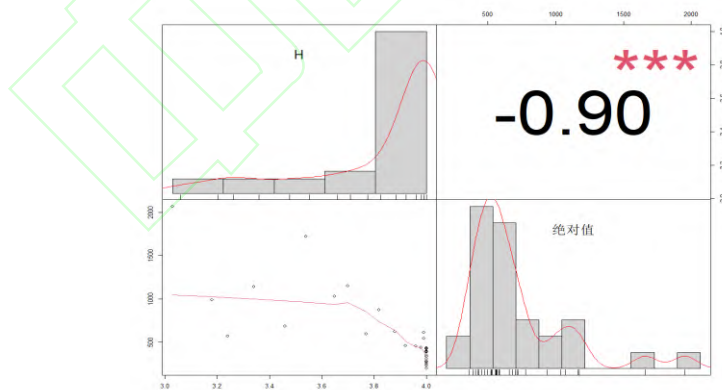


图 6 中国电网年均停电事故损失负荷绝对值与系统惯性常数分布及相关趋势

Figure 6 The distribution of the absolute value of the average annual power outage accident loss load of the Chinese power grid and the system inertia constant and related trends

### 4.2.2 中国电网年均停电事故损失负荷相对值与系统惯性常数的相关性分析

利用斯皮尔曼相关系数, 对 1990—2020 年中国电网年均停电事故损失负荷相对值和系统惯性常数进行相关性分析, 由式(5)得到  $r_s = 0.705$ , 由式(7)得到检验统计值  $z = 3.8614$ , 由  $z$  和正态分布密度函数得到  $P = 1.127 \times 10^{-4}$ , 可以判断得  $P \ll 0.01$ , 可以得出计算得到的斯皮尔曼相关系数  $r_s$  是显著的。由斯皮尔曼相关系数定义可知两组变量之间具有较强的相关性, 且两者相关性方向为正, 并以  $r_s = 0.705$  作为该相关性的度量, 以  $p = 1.127 \times 10^{-4}$  作为两者之间相关性度量的显著性水平。

图 7 为惯性常数和电网年均停电事故损失负荷相对值的散点图，图 8 为惯性常数和年均停电事故损失负荷相对值两者相关性分析的可视化结果，分别为系统惯性常数分布情况、两者的斯皮尔曼相关系数及显著性、两者相关性的趋势和年均停电事故损失负荷相对值分布情况。

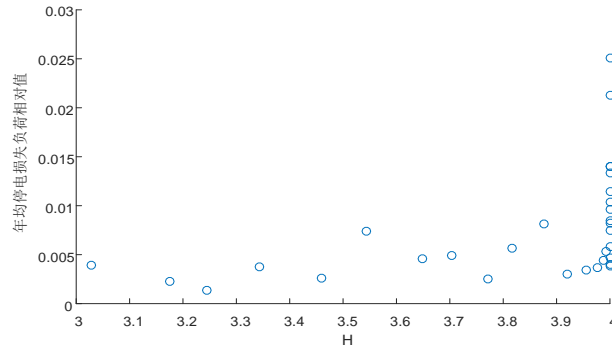


图 7 电网年均停电事故损失负荷相对值与系统惯性常数散点图

Figure 7 Scatter diagram of the relative value of the average annual power outage accident loss load of Chinese power grid and the system inertia constant

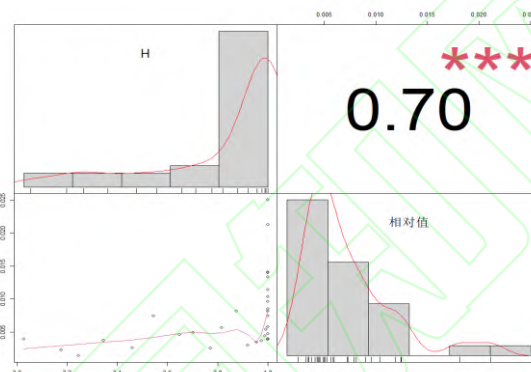


图 8 电网年均停电事故损失负荷相对值与系统惯性常数分布及相关趋势

Figure 8 The distribution of the relative value of the average annual power outage accident loss load of the Chinese power grid and the system inertia constant and related trends

#### 4.3 两组数据斯皮尔曼相关性系数的比较

电网年均停电事故损失负荷绝对值序列是取自不同时期和不同规模电网的事故数据，在上述分析中虽然可以验证随着系统惯性常数减小，年均停电事故损失负荷绝对值随之增大的趋势，但随着电网规模的扩大，却不能完全充分的对不同规模电力系统的停电损失负荷与系统惯性常数的相关程度进行横向对比，其量度在不断扩大的电网规模中参考性有所局限，所以在研究相关性时，对电网年均停电事故损失负荷取相对值分析是必要的。

采用相对值分析，考虑了各年份各地区的装机总量和电网规模不断扩大的因素，表现了该因素对年均停电事故损失负荷和系统惯性常数两者相关性的影响，可以使得时间段不同、规模不同的电网可以有效地根据斯皮尔曼相关系数来对两者的相关性做出有效度量和横向比较，分析的结果更符合我国近些年来电网的实际情况，更具有说服力。

通过对电网年均停电事故损失负荷绝对值和相对值结合分析，既能表现我国电网在新能源高速发展期间电力年均停电事故损失负荷规模在随着广义惯量水平下的惯性常数减小不断扩大，又可以做出横向对比，表明在新能源高速发展期间，随着管理水平的不断增强，电网结构更加强健，我国电网的电力年均停电事故损失负荷的相对值在随着广义惯量水平下的惯性常数减小而不断下降。

### 5 电网停电事故和系统惯性常数相关性变化及年均停电事故损失负荷预测

#### 5.1 电网年均停电事故损失负荷和系统惯性常数相关性变化

为了分析电网年均停电事故损失负荷与系统惯性常数之间相关性随着时间偏移的变化情况，本文以 1990—2020 年共 31 年的电网年均停电事故损失负荷绝对值和相对值的数据为基础，考虑两者相关性的阶段性问题，且防止样本过少，本文取步长为三年。因为从上述所知 2005 年之后事故损失负荷和系统惯性常数变化趋势逐渐显现，2010 年之后两者变化较明显，所以选取 1990—2011、1990



—2014、1990—2017、1990—2020 这 4 个时间段进行两者的相关性分析, 由第 3 节斯皮尔曼系数要求可知该四个样本符合斯皮尔曼相关系数的条件。用式(5)可以求得三个阶段电网年均停电事故损失负荷与系统惯性常数的斯皮尔曼相关系数, 式(7)和正态分布密度函数求得  $p$  值, 小于 30 组数据的通过查询斯皮尔曼相关性临界值表, 得到的结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 4 个时间段中国电网年均停电事故损失负荷绝对值和系统惯性常数的相关性变化

Table 2 Correlation changes between the absolute value of the average annual power loss of the Chinese power grid and the system inertia constant over the four time periods

| 时间段       | $r_s$  | $P$ 值                | 对应 $r_s$ 0.01 临界值 |
|-----------|--------|----------------------|-------------------|
| 1990—2011 | -0.805 |                      | 0.544             |
| 1990—2014 | -0.863 |                      | 0.511             |
| 1990—2017 | -0.894 |                      | 0.483             |
| 1990—2020 | -0.895 | $3.2 \times 10^{-6}$ |                   |

表 3 4 个时间段中国电网年均停电事故损失负荷相对值和系统惯性常数的相关性变化

Table 3 Correlation changes between the relative value of the average annual power loss of the Chinese power grid and the system inertia constant during the four time periods

| 时间段       | $r_s$ | $P$ 值                | 对应 $r_s$ 0.01 临界值 |
|-----------|-------|----------------------|-------------------|
| 1990—2011 | 0.576 |                      | 0.544             |
| 1990—2014 | 0.610 |                      | 0.511             |
| 1990—2017 | 0.637 |                      | 0.483             |
| 1990—2020 | 0.705 | $1.1 \times 10^{-4}$ |                   |

由表 2 和表 3 可知, 1990—2011、1990—2014、1990—2017 三个时间段两种情况的斯皮尔曼相关系数  $r_s$  都大于该样本数时所对应的斯皮尔曼相关临界值, 所以都具有统计意义, 进一步的验证了中国电网在时间不同、电网规模不断增大的情况下, 其两者的相关性方向是固定的, 非随机的。

另外, 由表 2 和表 3 可以得到, 中国电网事故损失负荷绝对值和系统惯性常数的  $r_s$  从 1990—2011 年的 -0.805 增大至 1990—2020 年的 -0.895; 中国电网事故损失负荷相对值和系统惯性常数的  $r_s$  从 1990—2011 年的 0.576 增大至 1990—2020 年的 0.705, 表明随着时间的推移, 这两种情况中的两组变量之间的斯皮尔曼相关系数的绝对值在逐步增大, 越来越趋近于 1, 结合斯皮尔曼相关系数的意义可知两者的相关性越来越强。对于绝对值来讲, 这是因为中国电网的规模在不断增大, 电网结构越来越复杂, 近年来极端天气事故频发, 导致电网停电事故损失负荷不断增大, 同时新能源装机占比增加迅速, 系统惯性常数下降速度加快, 所以导致了两者之间相关性的增强。对于相对值来讲, 虽然中国电网的规模在不断增大, 但是电网的管理水平不断增强, 电网更加强健, 事故损失相对值趋势呈减小, 如图 2 所示, 又因为上述原因系统惯性常数下降加快, 所以导致了两者之间相关性的增强。

## 5.2 中国电网年均停电事故损失负荷的趋势预测

图 1 和图 2 中的事故按照该次事故减供负荷与事故发生前总负荷的比值将电网事故等级划分成一般电网事故、重大电网事故和特大电网事故<sup>[27]</sup>, 本文中的停电事故指的是事故等级中的重大电网事故和特大电网事故。现在国家事故划分的标准并未发生改变, 所以可以运用上述的分析方法对未来中国电网特定事故等级的停电事故年均损失负荷绝对值和相对值做出预测。

结合现实统计的数据和文献[28]中提供的高比例可再生能源情境下发电装机容量的预测数据, 根据第三节的内容, 可以对未来的新能源装机占比和广义惯量水平下的系统惯性常数做出趋势预测, 如图 9 所示。

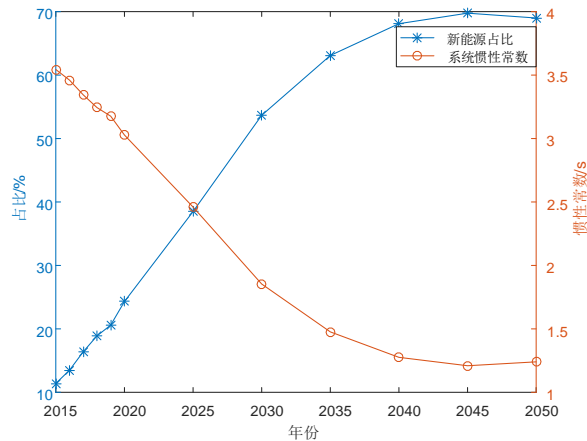


图 9 未来的新能源装机占比和系统惯性常数推演

Figure 9 Deduction of the proportion of new energy installed capacity and system inertia constant in the future

由图 9 可知，未来的新能源在电力行业发展上占据主导，在电力系统中的占比飞速增长，符合双碳目标整体思想，同时同步机的占比迅速减小，系统惯性常数明显降低，其降低速度 2020 年到 2030 年达到峰值，远大于近年来的变化速度，随后趋缓，2045 年新能源装机占比达到 70%，系统惯性常数达到谷底。

电网快速发展期，国内电网规模、新能源装机占比和电力系统的复杂性都在增加，近年来自然灾害相较多年前明显增多，电力故障成因和发展过程愈加复杂，由上一节可知，因为中国电网年均停电事故损失负荷绝对值与系统惯性常数之间相关性逐渐增强且为负相关，结合图 5 中对系统惯性常数的推演，所以预测按照减负荷来判断的电网大停电事故的年均损失负荷绝对值将会增大，到 2045 年趋于稳定。

由图 2 可得，随着时间的推移，发生的大停电事故损失负荷的相对值总体趋势在下降。在电网快速发展期，虽然系统结构和自然灾害频率在明显变化，但各地区电网管理水平逐步提高，且各地区装机容量总量增长速度大于事故损失负荷的增长速度。由上一节可知中国电网年均停电事故损失负荷相对值与惯性常数之间相关性逐渐增强且为正相关，结合图 9 中对系统惯性常数的推演，所以推测按照减负荷来判断的大停电事故的年均损失负荷相对值将会减小，到 2045 年趋于稳定。

综上所述，根据现有的数据和文献[28]给出的未来中国电网的理论装机容量，同时结合电网年均停电事故损失负荷绝对值、相对值和系统惯性常数之间的斯皮尔曼相关系数的意义，对中国电网年均停电事故损失负荷绝对值和相对值做出了宏观上的预测，得出了未来中国电网年均停电事故损失负荷绝对值将继续增大，其相对值将继续减小的趋势，且其增大和减小的趋势与广义惯量水平的惯性常数越来越密切。

## 6 结语

本文利用斯皮尔曼相关系数，分析了 1990—2020 年中国电网系统惯性常数和年均停电事故损失负荷的相关性，分析结果表明中国电网的系统惯性常数与年均停电事故损失负荷绝对值有较强的负相关性，与电网年均停电事故损失负荷相对值有较强的正相关性。并且通过对不同阶段两者相关性的分析，得出两者相关性随时间推移越来越强的结论。结合斯皮尔曼相关系数的意义和对未来至 2050 年系统惯性常数的推演，预测了中国电网未来年均停电事故损失负荷绝对值将越来越大，相对值将越来越小，且绝对值和相对值的变化趋势与系统惯性常数的减小趋势越来越密切。

需要注意的是，本文在分析时，并未考虑电网中对惯量降低策略的发展，例如虚拟惯量等方法。在下一步的研究中，将展开深入更细致化的研究，使结果更符合现代电网的发展，为电网安全运行提供参考，对事故预警提供依据。

## 参考文献

- [1] 于群, 曹娜. 基于复杂性理论的电力系统大停电机理及预测方法[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [2] 郭剑波, 于群, 贺庆. 电力系统复杂性理论初探[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] 刘中建, 周明, 李昭辉, 武昭原, 李庚银. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动

化设备:1-12.

Liu Zhongjian, Zhou Ming, Li Zhaohui, Wu Zhaoyuan, Li Gengyin. Overview of inertia control technology and inertia demand assessment for high-proportion new energy power systems [J]. Power automation equipment: 1-12.

- [4] 张武其,文云峰,迟方德,王康,李立.电力系统惯量评估研究框架与展望[J].中国电机工程学报,2021,41(20):6842-6856  
Zhang Wuqi, Wen Yunfeng, Chi Fangde, Wang Kang, Li Li. Research framework and prospect of power system inertia evaluation[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2021, 41(20): 6842-6856
- [5] 方勇杰.英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J].电力系统自动化, 2019,43(24):1-5.  
Fang Yongjie. The enlightenment of the "8·9" blackout in the UK on frequency stability control technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.
- [6] 孙华东, 许涛, 郭强, 李亚楼, 林伟芳, 易俊, 李文锋.英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报, 2019,39(21):6183-6192.  
Sun Huadong, Xu Tao, Guo Qiang, Li Yalou, Lin Weifang, Yi Jun, Li Wenfeng. Analysis of the "August 9" blackout accident in the UK and its enlightenment to Chinese power grid [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2019, 39(21):6183-6192.
- [7] P.Hines, J.Apt and S.Talukdar, "Trends in the history of large blackouts in the United States," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, pp.1-8.
- [8] 晁岱峰, 杨军选, 苏盛, 石东源.濮阳配电网故障的自组织临界性及其诱因[J].电网技术, 2011,35(1):72-75.  
Chao Daifeng, Yang Junxuan, Su Sheng, Shi Dongyuan. Self-organized criticality of Puyang distribution network faults and its inducement [J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 72-75.
- [9] 徐立新, 杨建梅, 潮铸, 刘明波.电网故障时间间隔的统计分布及非线性特征分析[J].电网技术, 2013,37(12):3482-3488.  
Xu Lixin, Yang Jianmei, Chao Zhu, Liu Mingbo. Statistical distribution and non-linear characteristic analysis of the time interval of power grid failures[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3482-3488.
- [10] 梅生伟, 薛安成, 张雪敏.电力系统自组织临界特性与大电网安全[M].北京: 清华大学出版社, 2009.
- [11] 于群, 屈玉清, 石良.基于相对值法和 Hurst 指数的电网停电事故自相关性分析[J].电力系统自动化, 2018,42(1):55-60+124.  
Yu Qun, Qu Yuqing, Shi Liang. Autocorrelation analysis of power grid outage accident based on relative value method and Hurst index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 55-60+124.
- [12] 于群, 屈玉清, 曹娜, 等.中国电网停电事故时间间隔的统计及分布特性分析[J].中国科学:技术科学, 2019, 49: 55 - 62  
Yu Qun, Qu Yuqing, Cao Na, et al. Statistics and distribution characteristics analysis of the time interval of power outages in Chinese power grid [J]. Science in China: Technological Sciences, 2019, 49: 55-62
- [13] 国家电网公司安全监察质量部.国家电网公司 2015 年安全生产事故报告[M].北京: 中国电力出版社, 2016
- [14] 国家电网公司安全监察质量部.国家电网公司 2016 年安全生产事故报告[M].北京: 中国电力出版社, 2017
- [15] 国家电网公司安全监察质量部.国家电网公司 2017 年安全生产事故报告[M].北京: 中国电力出版社, 2018
- [16] 国家电网公司安全监察质量部.国家电网公司 2018 年安全生产事故报告[M].北京: 中国电力出版社, 2019
- [17] 国家电网公司安全监察质量部.国家电网公司 2019 年安全生产事故报告[M].北京: 中国电力出版社, 2020
- [18] 国家电网公司安全监察质量部.国家电网公司 2020 年安全生产事故报告[M].北京: 中国电力出版社, 2021
- [19] 于群,石良,郭剑波,贺庆,易俊.基于相对值法的区域电网停电事故自组织特性分析[J].中国电力, 2016,49(1):91-95.  
Yu Qun, Shi Liang, Guo Jianbo, He Qing, Yi Jun. Analysis of self-organization characteristics of regional power grid outages based on relative value method[J]. China Electric Power, 2016, 49(1): 91-95.
- [20] 中国水利发电工程学会.中国水利发电年鉴[M].北京:中国电力出版社, 2013
- [21] 赵凯华, 罗蔚茵.惯性的本质[J].大学物理,1995(4):1-4.  
Zhao Kaihua, Luo Weiyin. The essence of inertia[J]. College Physics, 1995(4):1-4.
- [22] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 杨超, 魏巍, 赵兵.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.  
Sun Huadong, Wang Baocai, Li Wenfeng, Yang Chao, Wei Wei, Zhao Bing. Research on Inertia System of Frequency Response for Power System With High Penetration Electronics [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [23] 中国电力企业联合会.中国电力统计年鉴 2020[M].北京: 中国统计出版社, 2020
- [24] Q.Shi,F.Li andH.Cui, "Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system

dynamic studies," 2019 I-EEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2019, pp.1-1.

[25] 张文耀.用斯皮尔曼系数衡量网络的度相关[D].中国科学技术大学,2016.

Zhang Wenyao. Using Spearman's coefficient to measure the degree correlation of the network [D]. University of Science and Technology of China, 2016.

[26] 龚凤乾.等级相关系数公式的证明应用及统计显著性检验[J].现代财经-天津财经学院学报, 1987(1):33-36.

Gong Fengqian. Proof application and statistical significance test of rank correlation coefficient formula [J]. Modern Finance and Economics-Journal of Tianjin University of Finance and Economics, 1987(1):33-36.

[27] 国家电网公司.国家电网公司电力生产事故调查规程[M].北京:中国电力出版社, 2005.

State Grid Corporation. State Grid Corporation of China Electric Power Production Accident Investigation Regulations [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[28] 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R].国家发展和改革委员会, 2012.

Research on Chinese 2050 High Proportion of Renewable Energy Development Scenarios and Pathways [R]. National Development and Reform Commission, 2012.

## 附录

2015—2020 年我国电网发生的大停电事故

| 序号 | 事故名称              | 事故时间       | 损失负荷     |
|----|-------------------|------------|----------|
| 1  | 2015 年西藏 1·23 事故  | 2015-1-23  | 175 MW   |
| 2  | 2015 年西藏 2·15 事故  | 2015-2-15  | 132 MW   |
| 3  | 2015 年山西 4·2 事故   | 2015-4-2   | 850 MW   |
| 4  | 2015 年宁夏 4·2 事故   | 2015-4-2   | 600 MW   |
| 5  | 2015 年陕西 4·17 事故  | 2015-4-17  | 1200 MW  |
| 6  | 2015 年宜宾 7·13 事故  | 2015-7-13  | 5700 MW  |
| 7  | 2015 年复奉 7·19 事故  | 2015-7-19  | 640 MW   |
| 8  | 2015 年江苏 9·19 事故  | 2015-9-19  | 4900 MW  |
| 9  | 2015 年山西 11·5 事故  | 2015-11-5  | 1300 MW  |
| 10 | 2016 年广东 5·10 事故  | 2016-5-10  | 396 MW   |
| 11 | 2016 年西安 6·18 事故  | 2016-6-18  | 243 MW   |
| 12 | 2016 年湖南 9·7 事故   | 2016-9-7   | 1320 MW  |
| 13 | 2016 年河南 9·7 事故   | 2016-9-7   | 120 MW   |
| 14 | 2017 年贵州 2·22 事故  | 2017-2-22  | 1340 MW  |
| 15 | 2017 年西藏 3·27 事故  | 2017-3-27  | 180 MW   |
| 16 | 2017 年西北 3·31 事故  | 2019-3-31  | 2670 MW  |
| 17 | 2017 年高肇 4·7 事故   | 2017-4-7   | 2700 MW  |
| 18 | 2017 年山西 4·13 事故  | 2017-4-13  | 1150 MW  |
| 19 | 2017 年广东 6·13 事故  | 2017-6-13  | 382 MW   |
| 20 | 2017 年广东 7·11 事故  | 2017-7-11  | 450 MW   |
| 21 | 2017 年肇庆 7·14 事故  | 2017-7-14  | 3000 MW  |
| 22 | 2017 年广东 9·2 事故   | 2017-9-2   | 171.4 MW |
| 23 | 2018 年云南 6·16 事故  | 2018-6-16  | 1400 MW  |
| 24 | 2018 年海南 7·24 事故  | 2018-7-24  | 160 MW   |
| 25 | 2018 年湖北 11·26 事故 | 2018-11-26 | 150 MW   |
| 26 | 2019 年重庆 5·6 事故   | 2019-5-6   | 1480 MW  |
| 27 | 2019 年海南 7·24 事故  | 2019-7-24  | 160 MW   |
| 28 | 2019 年台山 9·17 事故  | 2019-9-17  | 1730 MW  |
| 29 | 2019 年山西 9·21 事故  | 2019-9-21  | 590 MW   |
| 30 | 2020 年内蒙 3·19 事故  | 2020-3-9   | 690 MW   |
| 31 | 2020 年阳江 3·25 事故  | 2020-3-25  | 6516 MW  |
| 32 | 2020 年南方 3·30 事故  | 2020-3-30  | 1200 MW  |
| 33 | 2020 年南方 4·9 事故   | 2020-4-9   | 1441 MW  |

|    |                  |           |         |
|----|------------------|-----------|---------|
| 34 | 2020 年内蒙 4·23 事故 | 2020-4-23 | 380 MW  |
| 35 | 2020 年南方 5·25 事故 | 2020-5-25 | 3000 MW |
| 36 | 2020 年山东 6·24 事故 | 2020-6-24 | 1238 MW |



于群

**作者简介:**

于群 (1970), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统安全分析、继电保护的研究工作, yuqun\_70@163.com;

\*通信作者: 霍筱东(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全分析、电网态势评估, hxiaodong\_97@163.com

