

电网频率紧急协调控制系统的可靠性评估

张泰东¹
ZHANG Taidong

摘要

随着电网规模的逐步扩大，安控系统的规模也日益庞大，涉及的装置众多，且装置之间逻辑关系复杂，安控系统的可靠性评估也变得越来越困难。现有的研究主要侧重于单台装置或者小型系统的可靠性评估，针对大型安控系统的可靠性评估还较少。文章首先阐述了单个厂站安控系统的配置方案，以华东电网频率紧急协调控制系统为例，介绍了其整体架构；然后利用故障树法分别求取了直流功能模块、抽蓄功能模块和切负荷功能模块的拒动失效率和误动失效率，并基于马尔可夫状态空间法对华东电网频率紧急协调控制系统单个功能模块进行了可靠性的评估；最后，对整个系统进行了非序贯蒙特卡罗法的仿真，为后续大型安控系统的整体可靠性评估提供参考。

关键词

电网频率；安控系统；紧急协调控制系统；可靠性评估

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.020

0 引言

随着社会经济快速发展，电力需求持续增长，电网规模随之不断扩大，安全稳定控制系统（简称“安控系统”）作为保障电网安全运行的核心环节，其结构日益复杂、涉及装置数量大幅增加，装置间逻辑关联也更为紧密，这使得安控系统的可靠性评估难度显著提升。当前，学术界与工业界对安控系统可靠性的研究，多集中于单台装置或小型系统层面，针对大型、广域安控系统的整体可靠性评估成果相对匮乏。而大型安控系统一旦发生故障，可能引发电网频率波动、负荷损失甚至大面积停电等严重后果，因此开展其可靠性评估研究具有重要现实意义。华东电网作为我国经济最活跃地区的核心电力枢纽，其频率紧急协调控制系统规模庞大、功能关键，是典型的大型安控系统代表。本文以该系统为研究对象，系统开展可靠性评估方法研究，旨在为大型安控系统的可靠性分析提供科学思路与实践参考，进一步保障大电网的安全稳定运行。

1 华东电网安全稳定控制系统的配置原则及架构

1.1 单厂站安全稳定控制系统的配置方案

安控系统在单个厂站内一般有3种配置方案，即单机系统、双机系统和三机容错系统，配置方案不同其出口回路的运行模式也不同。

（1）单机系统。单个厂站内仅安装一套安控装置，其优点是经济性较好，投资省，但其可靠性较低。装置故障检

修时需停运，停运时一次系统处于无保护状态，存在一定的风险。

（2）双机系统。在单个厂站内安装两套安控装置，一套退出运行时，另一套可以继续监测电网的运行状况，并在故障时启动控制措施。双机系统分为主辅和并列两种运行模式。对于主辅运行模式，若主运动作，则闭锁辅运装置；若主运装置拒动，则辅运装置延时出口动作，并闭锁主运装置^[1]。并列运行模式包括并联出口和串联出口两种方式，并联出口采用“二取一”的逻辑方式，动作时执行两套装置动作集合的并集；串联出口采取“二取二”的逻辑方式，动作时执行两套装置动作集合的交集。

（3）三机容错系统。单个厂站内安装三套安控装置。出口回路采取“三取二”的逻辑方式。一套装置故障停运时，剩余两台装置变为双主并联模式运行。三机容错系统采用三取二的运行方式，可有效降低系统的失效率，缺点是经济性较差，投资较多。

1.2 华东电网频率紧急协调控制系统的架构

传统的安控系统一般分为3个层级：控制主站、控制子站和执行站。由于电力系统日渐庞大，负责区域稳定的控制主站已经不能满足广域化控制的需要，因此需要在传统的安控系统架构上增加协控总站层。协控总站是整个系统的总指挥，总协调决策单元，是对大型电网的可控资源进行协调控制的重要枢纽单元。通常安装在重要的枢纽变电站或换流站^[2]。

控制主站通常装设在枢纽站，同安装在不同厂站的控制

1. 安徽理工大学 安徽淮南 232001

子站进行数据和信息之间的相互交换，采集整个电网的信息，判断电网出现的故障并采取预定的控制措施，向控制子站发送控制命令。控制主站一般采用双套配置，采用主辅、并列等出口模式。

安控系统子站一般装设在较重要的电厂、变电站，监测本站的出线以及主变等一系列设备的运行状态，将信息上传到安控系统主站。接收上一级主站下发的控制指令，在本站进行命令执行；发送控制指令到下一级的执行站，实现上传下达的功能。与安控系统主站相似，通常采用双套配置，采用主辅、并列等出口模式。

安控系统执行站通常装设在需要执行切机、切负荷的电厂或变电站，将本站的数据信息传送到上层安控系统子站或安控系统主站，接受上层安控系统子站或安控系统主站下发的控制命令，根据控制策略，选取控制对象，进行输出控制。与控制主站和控制子站不同，安控系统执行站在仅接收远方命令功能时，可以采取单套配置；若具有策略搜索功能且需对被控量进行排序时，则应双套配置。双套配置也可采用主辅、并列等出口模式。

2 华东电网频率紧急协调控制系统功能模块的可靠性评估

2.1 基于故障树法的可靠性评估

安控系统的故障可分为拒动和误动，在华东电网频率紧急协调控制系统中，单套装置的拒动和误动，对于系统的影响是不同的。如安控主站中，采用双主并联模式时，单套装置拒动，不会对系统的功能造成影响；若单套装置误动，则会造成整个系统的误动。因此，对于安控系统的拒动和误动失效率应分开讨论。与直流及抽蓄单个子站对应的安控系统功能模块，如直流子站功能模块（如图1中虚线内部分）及抽蓄功能模块，与切负荷子站功能模块的架构不同，将其分开讨论。

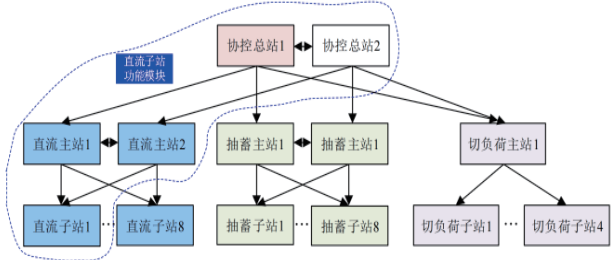


图1 华东电网频率紧急协调控制系统

2.1.1 直流及抽蓄功能模块的故障树模型

由图1可见，与单个直流子站和抽蓄子站所对应的安控系统架构相同，对应的功能模块架构可简化为图2所示的形式。A和B分别表示单站双重化2套装置，下标1表示异地双套装置。

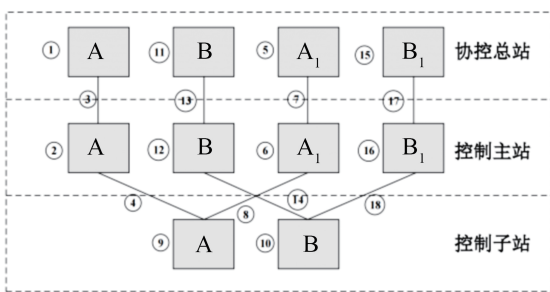


图2 直流及抽蓄功能模块架构

根据图2建立直流及抽蓄功能模块的故障树模型，分别如图3和4所示。

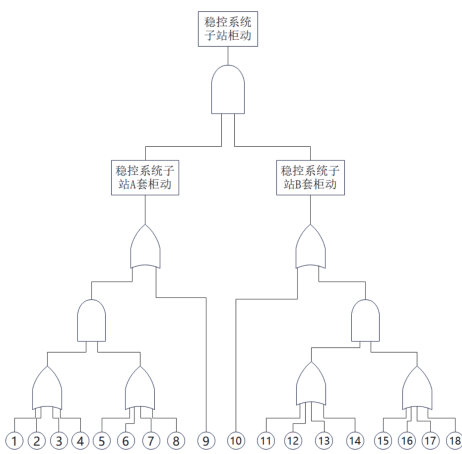


图3 直流及抽蓄功能模块拒动故障树模型

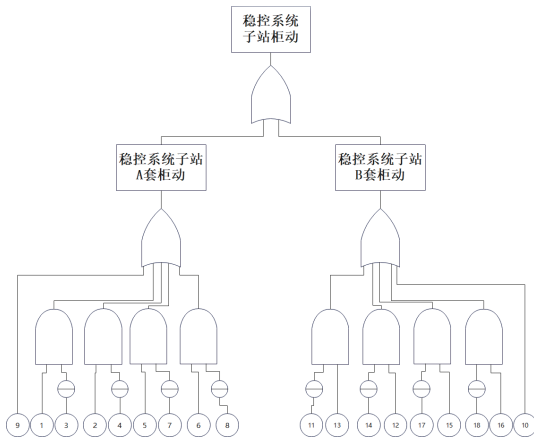


图4 直流及抽蓄功能模块误动故障树模型

图2~4中各序号的含义如表1所示。

表1 各序号的含义

序号	含义	序号	含义
①	协调总站 A 套装置	⑩	控制子站 B 套装置
②	控制主站 A 套装置	⑪	协调总站 B 套装置
③	协调总站 A 套与控制主站 A 套之间通信线路	⑫	控制主站 B 套装置
④	控制主站 A 套与控制子站 A 套之间通信线路	⑬	协调总站 B 套与控制主站 B 套之间通信线路

表 1(续)

序号	含义	序号	含义
⑤	协控总站 A ₁ 套装置	⑭	控制主站 B 套与控制子站 B 套之间通信线路
⑥	控制主站 A ₁ 套装置	⑮	协控总站 B ₁ 套装置
⑦	协控总站 A ₁ 套与控制主站 A ₁ 套之间通信线路	⑯	控制主站 B ₁ 套装置
⑧	控制主站 A ₁ 套与控制子站 A ₁ 套之间通信线路	⑰	协控总站 B ₁ 套与控制主站 B ₁ 套之间通信线路
⑨	控制子站 A 套装置	⑱	控制主站 B ₁ 套与控制子站 B ₁ 套之间通信线路

2.1.2 切负荷功能模块故障树模型

根据图 2 可得切负荷功能模块可简化为图 5 所示的形式。

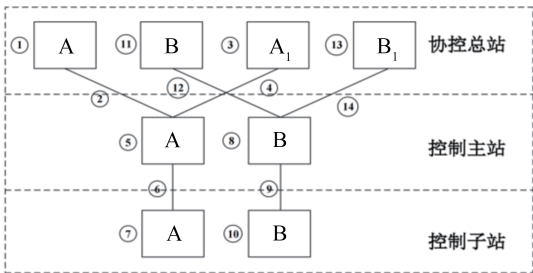


图 5 切负荷功能模块架构

根据图 5，建立切负荷功能模块的拒动以及误动故障树模型，分别如图 6 和 7 所示。

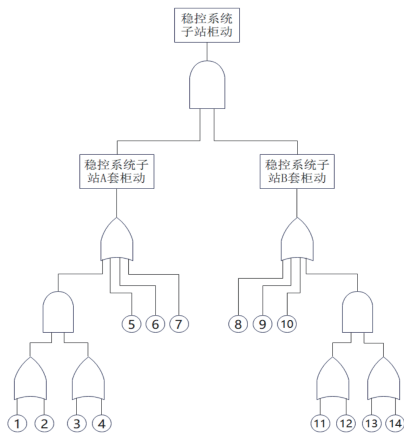


图 6 切负荷功能模块拒动故障树图

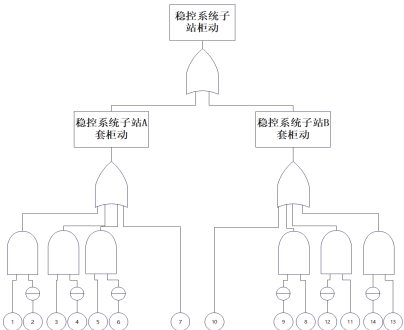


图 7 切负荷功能模块误动故障树图

图 5~7 中各序号的含义如表 2 所示。

表 2 各序号的含义

序号	含义	序号	含义
①	协控总站 A 套装置	⑧	控制主站 B 套装置
②	协控总站 A 套与控制主站 A 套之间通信线路	⑨	控制主站 B 套与控制子站 B 套之间通信线路
③	协控总站 A ₁ 套装置	⑩	控制子站 B 套装置
④	协控总站 A ₁ 套与控制主站 A ₁ 套之间通信线路	⑪	协控总站 B 套装置
⑤	控制主站 A 套装置	⑫	协控总站 B 套与控制主站 B 套之间通信线路
⑥	控制站 A 套与控制子站 A 套之间通信线路	⑬	协控总站 B ₁ 套装置
⑦	控制子站 A 套装置	⑭	协控总站 B ₁ 套与控制主站 B ₁ 套之间通信线路

2.1.3 算例分析

针对图 2 的直流及抽蓄功能模块，采用图 3 与图 4 故障树模型；同时，针对图 5 的切负荷功能模块，采用图 6 和图 7 的故障树模型，计算单个功能模块拒动和误动的失效率。

假设华东电网频率紧急协调控制系统装置采用同型号设备，因此可假设所有的装置失效率相等；由于各站点间均通过专用 2 Mbit/s 通信通道相互联络，可假设其线路失效率均相等。同时在对单个功能模块进行拒动和误动的失效率计算时，假设安控装置的拒动失效率与误动失效率相等。这里安控装置的失效率采取表 3 中故障树法结果，即 $\lambda=4.201\ 23\times10^{-5}$ 次/h，根据文献 [3] 可得通信线路的失效率为 1.392×10^{-5} 次/h。不同功能模块的失效率结果如表 3 所示。

表 3 不同功能模块的失效率

故障	直流及抽蓄功能模块失效率/(次·h ⁻¹)	切负荷功能模块失效率/(次·h ⁻¹)
拒动	$1.766\ 08\times10^{-9}$	$9.593\ 75\times10^{-9}$
误动	$8.402\ 93\times10^{-5}$	$8.402\ 81\times10^{-5}$

由表 3 可知：

- (1) 各子站所对应的安控系统功能模块的拒动失效率非常小，基本可以忽略。
- (2) 切负荷功能模块的拒动失效率大约为直流及抽蓄功能模块失效率的 5 倍，而直流及抽蓄功能模块的误动失效率与切负荷功能模块的误动失效率近似相等。

2.2 基于马尔可夫状态空间法的华东电网频率紧急协调控制系统功能模块可靠性评估

安控系统由分布在不同厂站的安控装置以及装置之间的

通信线路组成，属于可修复系统，因此存在多种不同的状态。将安控系统作为一个整体进行状态划分。

状态划分时采用如下假设：

(1) 某时间段内安控系统只可能发生一种失效，即失效事件之间相互独立。

(2) 安控系统失效后可经修复恢复到正常工作状态，不引入新的故障。

(3) 对安控系统可靠性评估时仅评估硬件系统，忽略软件部分。

(4) 考虑因一次系统的故障触发安控系统拒动或误动。

上述假设下，建立安控制系统的马尔可夫状态空间模型，如图 8 所示。

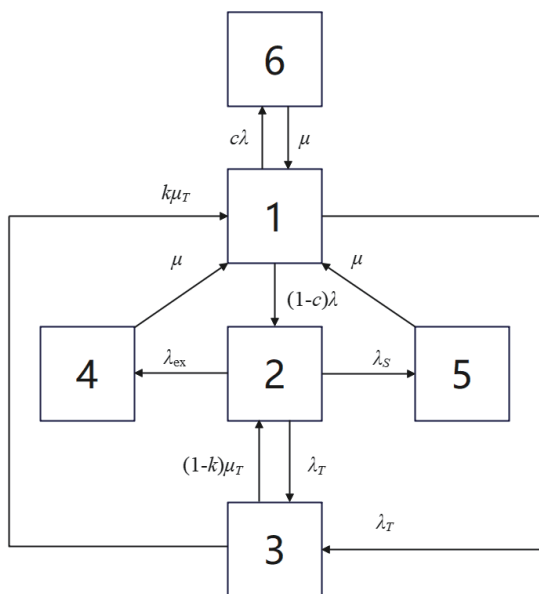


图 8 安全稳定控制系统的马尔可夫模型

图 8 中， λ 代表安控制系统的失效率； λ_T 代表系统的检修率，为检修周期的倒数； λ_s 代表系统保护范围内线路的失效率，即系统的拒动触发率； λ_{es} 代表系统保护范围外线路失效率，即系统的误动触发率； μ 代表系统故障后的修复率，为修复时间的倒数； μ_T 代表系统定期检修维修率，为检修时长的倒数； c 代表系统的自检成功率； k 表示系统的检修修复成功率。各编号代表的状态分别为：

- (1) 1 表示安控系统处于正常运行状态；
- (2) 2 表示安控系统处于隐性故障状态；
- (3) 3 表示对安控系统定期进行检修；
- (4) 4 表示系统保护范围外的某些线路故障时，安控系统由于故障而误动；
- (5) 5 表示系统保护范围内的某些线路故障时，安控系统由于故障而拒动；
- (6) 6 表示安控系统自检发现故障。

由马尔可夫状态空间法，可得安控制系统的状态概率密度

矩阵为：

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & (1-c)\lambda & \lambda_T & 0 & 0 & c\lambda \\ 0 & q_{22} & \lambda_T & \lambda_{ex} & \lambda_s & 0 \\ k\mu_T & (1-k)\mu_T & -\mu_T & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中：对角元表示系统的自转移率， $q_{11} = -(\lambda + \lambda_T)$ ， $q_{22} = -(\lambda_{ex} + \lambda_s + \lambda_T)$ 。由上述公式可得：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^6 p_i = 1 \\ PQ = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据式 (2) 即可求出系统处于各状态的概率，即状态 P 中的各元素 $p_1 \sim p_6$ 。系统正常运行概率可表示为状态 1 和状态 2 的和，即：

$$P = p_1 + p_2 \quad (3)$$

系统误动状态概率：

$$P_w = p_4 \quad (4)$$

系统拒动状态概率：

$$P_j = p_5 \quad (5)$$

2.3 算例分析

针对图 3 和图 6 对应的安控系统功能模块，采用马尔可夫状态空间法对其进行可用度评估。评估时，各功能模块的失效率采用表 3 的结果，即直流及抽蓄功能模块的失效率 λ 为 8.403×10^{-5} 次/h，切负荷功能模块的失效率 λ 为 8.403×10^{-5} 次/h。同时，根据工程实际的经验取各功能模块的修复时间为 24 h，即 $\mu = 0.04167$ 次/h；一次设备的故障率参考文献 [4]，分别取值为 $\lambda_s = 0.01$ 次/y， $\lambda_{es} = 0.00125$ 次/y；检修修复成功率 $k = 0.9$ ，自检成功率 $c = 0.9$ ；装置的定期检修周期为 8760 h，则 $\lambda_T = 1.1416 \times 10^{-4}$ 次/h；每次检修的修复时间为 24 h，则 $\mu_T = 0.04167$ 次/h。

根据上述公式，可得安控系统各状态的概率。

表 4 安全稳定控制系统各功能模块的可靠性指标

功能模块	可用度 /%	拒动状态概率	误动状态概率
直流或抽蓄功能模块	99.574 89	$4.365\ 77 \times 10^{-6}$	$5.457\ 20 \times 10^{-7}$
切负荷功能模块	99.574 88	$4.365\ 89 \times 10^{-6}$	$5.457\ 36 \times 10^{-7}$

从表 4 可以看出：

- (1) 直流及抽蓄功能模块，以及切负荷功能模块可用度都非常高，且彼此之间相差不大。
- (2) 安控制系统的拒动和误动状态的概率很小，几乎可以忽略。

3 华东电网频率紧急协调控制系统的可靠性评估

华东电网频率紧急协调控制系统包括 8 个直流控制子站, 8 个抽蓄控制子站以及 4 个切负荷控制子站, 其中任意一个子站所对应的功能模块发生故障, 都会影响到整个安控系统的完整。上述章节研究了几个典型功能模块的可靠性评估, 缺乏对安控系统整体可靠性评估的研究。

为研究安控系统整体可靠性, 这里借用安控装置可用度定义, 提出了安控系统的功能完整度概念。功能完整度 P 定义为: 安控系统所有功能模块在某一时刻全部处于正常运行的概率。功能完整度 P 将整个安控系统作为一个整体进行可靠性评估, 可以清晰地反映出安控系统处于功能完整状态的概率, 为安控系统的整体可靠性评估工作提供了新的思路。评估方法采用非序贯蒙特卡罗法。

3.1 非序贯蒙特卡罗法

非序贯蒙特卡罗法也被叫作状态抽样法。一个系统的状态是由组成这个系统各元件的状态所决定, 非序贯蒙特卡罗法通过抽取组成系统各元件的状态, 组合得到系统的状态。由于非序贯蒙特卡罗法抽样程序简单, 因此在大型电力系统的风险评估中得到广泛应用。在使用非序贯蒙特卡罗法对安全稳定控制系统进行可靠性评估时, 需要的参数是每个功能模块的可用度。由于每台装置所接的 I/O 口不同, 所以可假设功能模块的可用度相互独立, 因此其概率分布相互独立, 符合非序贯蒙特卡罗法使用的前提条件。非序贯蒙特卡罗法的原理如下简述。

将每个功能模块可用度的概率分布用一个 $[0,1]$ 的均匀分布来描述, 每个功能模块存在可用和不可用两种状态。用 S_i 表示功能模块 i 的状态, 用 Q_i 表示功能模块 i 的不可用度, 产生一个在 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数, 则有:

$$S_i = \begin{cases} 1(\text{工作状态}) & \text{if } Q_i \leq R_i \leq 1 \\ 0(\text{失效状态}) & \text{if } 0 \leq R_i \leq Q_i \end{cases} \quad (6)$$

含 n 个功能模块的系统状态可用 S 表示:

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (7)$$

在每一次抽样完成后, 判断整个系统所有功能模块是否处于正常工作状态。当抽样的次数足够多时, 系统状态 S 出现的频率可作为其概率的无偏估计。

$$P(s) = \frac{n(s)}{N} \quad (8)$$

式中: N 为抽样次数; $n(s)$ 为状态 s 出现的概率。

3.2 算例分析

针对图 1 的华东电网频率紧急协调控制系统, 对其进行功能可用度的求解。单次仿真具体步骤如下:

步骤一: 设置最大抽样次数 N , 设置 $m=0, n=0, Q_1=Q_2=\dots=Q_{16}=Q_z$ 。

步骤二: 按式 (6) 进行抽样, 判断 $S=1$ 是否成立, 若成立, 则 $m=m+1$ 。令 $n=n+1$ 。

步骤三: 判断 $n < N$ 是否成立, 若成立, 则转步骤二; 不成立, 则转步骤四。

步骤四: 计算功能完整度为:

$$P = \frac{m}{N} \quad (9)$$

根据表 4 中的安控系统各功能模块的可靠性计算结果, 可知直流及抽蓄功能模块的不可用度 $Q_z = 4.2511 \times 10^{-3}$, 切负荷功能模块的不可用度 $Q_q = 4.2512 \times 10^{-3}$, 设置抽样次数 $N = 500\,000$, 取 5 次仿真的平均值, 由非序贯蒙特卡罗法, 根据式 (9) 计算安控系统整体的功能完整度, 结果为 91.833%。与安控装置的可靠性相比, 其可靠性降低, 原因在于安控系统包含的功能模块多, 增加了安控系统隐性故障的风险。

4 结语

本文以华东电网频率紧急协调控制系统为例, 给出了该安控系统的架构。根据该架构, 建立各功能模块的故障树模型, 据此求取各功能模块的拒动失效率和误动失效率。在此基础上, 将安控系统功能模块划分为 6 个状态, 利用马尔可夫状态空间法求解功能模块处于各个状态的概率。最后, 提出了安控系统的功能完整度概念, 将华东电网频率紧急协调控制系统看作整体, 并利用非序贯蒙特卡罗法求解了其功能完整度。

参考文献:

- [1] 孙光辉, 毕兆东, 赵希才, 等. 电力系统在线安全稳定评估及决策技术的研究 [J]. 电力系统自动化, 2005(17):81-84.
- [2] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16):163-170.
- [3] 肖世杰. 电网安全稳定控制应用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 王古月, 易强. 安全稳定控制装置的功能和应用 [J]. 江苏科技信息, 2016(32):67-68.

【作者简介】

张泰东 (1999—), 男, 安徽肥东人, 硕士, 助理工程师、机电设备管理员, 研究方向: 电力系统及其自动化。

(收稿日期: 2025-11-05 修回日期: 2026-01-09)