

[配电网]

# 考虑信息系统和风电出力影响的配电网信息物理系统可靠性研究

文/云南华电金沙江中游水电开发有限公司阿海发电分公司 赵雨梦 尹志超 黄新祥  
昆明理工大学 王洪亮  
昆明北方红外技术股份有限公司 钱 程 王秀楠

对影响配电网信息物理系统（CPS）可靠性的主要影响因素展开研究。仿真结果显示，当通信系统采用星形结构时，配电网CPS的可靠性明显增加，主机和控制器是影响CPS可靠性的重要因素；增大风机容量可明显提高配电网CPS的可靠性，但当风机容量不断增大时，对系统可靠性的改善会趋于饱和。

传统电力系统功能显然已经不能满足人们对自动控制的要求，因此在电力系统中引入信息技术使其更好地为用户服务已成为现代电力系统以及智能电网的发展趋势。通过信息技术（Communicating）、控制技术（Controlling）及计算技术（Computing）实现传统配电网与信息系统的深度融合，电力系统配电网便具备了配电网信息物理系统（CPS）的特征。新型电力系统需要综合各种指标与情况进行分析，综合考虑每种情况的后果严重性，在电力系统可承受风险范围内进行决策。

近几年，电力系统可靠性分析与研究已有较大进展，电力系统安全性评估已离不开其可靠性的辅助分析，但当出现意外故障时，确定性方法已不再适用于配电网可靠性分析，当一些小概率却影响巨大的事件发生时，将造成无法挽回的后果。因此，亟待提出一套行之有效的算法，用于电力系统配电网的可靠性分析与研究。

信息系统基础是离散数学，而电力物理系统是连续的，如何将这两个不同的系统关联起来并实现实时仿真成为当下研究与讨论的热点。文献[2]抓住电力CPS一二次系统的相互耦合的形式，以能量

管理系统为例，分析信息系统影响下的电力系统的可靠性。先对电力信息物理系统建模，以信息-物理混成计算为基础，评估电力信息物理系统运行可靠性。文献[3]利用蒙特卡洛法进行元件级可靠性分析，仿真结果表明所提模型能够更好地描述复杂网络耦合机理，对提高电力信息物理系统的鲁棒性有很大启发。在仿真平台搭建方面，汤奕等人从电力通信网络可靠性、通信系统故障的影响和电力信息复合系统三方面展开研究，提出MATLAB和OMNeT++的联合仿真方案，对信息物理系统的仿真进行了优化。

传统配电网可靠性研究只针对配电网本身，而未加入信息系统的影响，本文研究了影响配电网CPS可靠性的因素，利用蒙特卡洛算法，分别针对其主要影响因素进行了分析研究，得到一些有益结论，对研究配电网可靠性和信息物理系统都具有丰富的意义。

## 配电网信息物理系统的信息-物理交互过程分析

信息物理系统（Cyber-Physical Systems, CPS），是集多种采集、控制、计算、反馈及执行

基金项目：中国博士后科学基金资助项目（2019M653496）

为一体的复杂系统。信息物理系统包含三层结构,如图1所示,分别为物理层、网络层和应用层。物理层有许多智能电子设备(IEO),负责采集并上传设备变化信息。网络层可以看作是一个大型互联网,进行信息的收集与共享。应用层主要通过人机接口为用户提供服务,使用户能够更好地掌握系统情况。

信息物理系统的IED感受外界信息变化,发送该信号给网络层,网络层之间信息向上层层传递,最终由应用层决策,下发控制指令到物理系统,物理系统再执行指令,以达到控制改善物理系统的目的。

当物理系统IED感知的信号发生错误时,会影响信息系统决策的精确性和实时性。同样,当信息系统下发的信号有误时,也会影响对物理系统的优化控制。

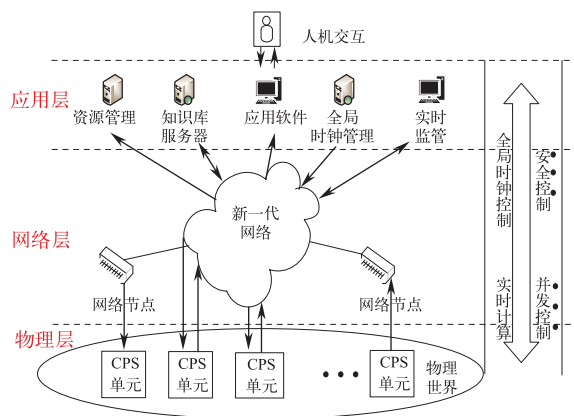


图1 信息物理系统三层结构

信息系统正常工作状态下,“物理-信息-物理”的闭环控制可保证配电网物理系统安全可靠运行;同样,由于配电网CPS是一个闭环系统,当信息系统出现故障时,就可能做出影响配电网物理系统正常安全运行的错误决策,甚至导致电力系统故障。

综上,分析配电网CPS的可靠性,就必须首先了解配电网CPS中信息-物理的交互方式,在此基础上才能更好地分析信息系统工作模式,以及信息系统对电力物理网的影响方式。

### 配电网CPS可靠性的影响因素

在传统配电网的可靠性研究中,影响配电网可靠性的常见因素有以下几种:

1) 结构因素。配电网的架设不可避免地会经过

建筑物、植物等,影响配电网的结构安全性。

2) 线路因素。引起线路故障的原因有很多,例如冰雪天气下,导线结冰下垂,会拉大导线弧垂,引起短路事故。

3) 设备因素。设备发生老化或故障也会直接影响配电网的安全性、可靠性。

4) 自然灾害。

5) 其他因素。例如配电网的检修和人为破坏等。

本文从信息系统的控制对配电网可靠性的影响和风力发电对配电网可靠性的影响两方面进行探讨。

### 1. 信息系统的控制对配电网CPS可靠性的影响

信息系统在配电网CPS中主要起着监视和控制的功能。信息-物理作用对配电网有间接作用和直接作用两类。

#### (1) 信息-物理间接作用

配电网CPS的信息-物理间接作用指的是信息系统对电力物理网的监视功能,监视功能不会引起物理结构的改变,只会引起物理网故障的扩大。

#### (2) 信息-物理直接作用

信息-物理直接作用体现为配电网CPS的信息系统对电力物理网的控制功能。信息系统控制功能失效后,对电力物理网的直接影响有两种表现形式:误动作和拒动作。此处的拒动作指发生在系统运行方式调整时的拒动作,区别于保护功能的拒动作。此处所指断路器误动作故障特指误分故障。

基于以上分析,断路器信息-物理直接作用的可靠性模型为

$$A = A_1 \cap A_2 \cap A_3 \quad (1)$$

式中, $A$ 表示断路器的综合可用率; $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ 表示为断路器操作、保护和重合闸功能的可用率。

而考虑信息-物理直接作用关系后的断路器可用率 $A'$ 为

$$A' = AA_i \quad (2)$$

式中, $A_i$ 表示不考虑信息-物理直接作用关系的断路器可用率。

信息系统常用的结构有总线形、环形和星形三种,本文针对信息系统不同结构和信息元件的故障率对配电网CPS的影响展开研究。

### 2. 风电出力对配电网CPS可靠性的影响

近年来,分布式发电在配电网的广泛应用改变

了传统配电网结构和运行方式,也给传统电网可靠性带来显著影响,而分布式电源与电网的协调离不开信息系统的控制。由于风电出力的不确定性,大规模风电并网后,电网电能质量及安全稳定运行会受到一定的影响。因此,考虑风电出力不确定性的配电网CPS可靠性研究及电力系统优化调度研究具有一定的现实意义。

## 考虑信息系统影响的配电网CPS可靠性研究模型

传统配电网可靠性评估只对配电网本身进行研究,而配电网CPS融合了电力系统配电网以及CPS的典型特征。因而本节提出考虑信息系统对配电网物理系统影响的配电网CPS可靠性模型,得到一些有益结论。

在考虑信息系统影响的配电网CPS可靠性模型中,信息系统功能指的是:信息系统在完成对物理系统的改变、控制的过程中,需要完成的有关任务。信息-电力的直接作用:若信息系统故障,则配电网CPS中的电力物理设备不能正常工作;同理,若配电网CPS电力物理设备故障,信息系统也不能完成对配电网CPS电力物理设备的控制,这种相互作用、互相影响的关系称为信息-电力直接作用关系,如图2所示。

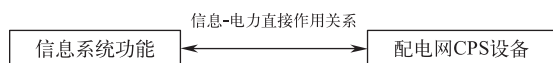


图2 配电网CPS信息-电力作用关系示意图

本文针对信息系统对配电网CPS可靠性的影响进行研究。在这个过程中,可以认为,任何一个物理或信息节点以及某条线路的连接发生故障,即认为该线路上节点功能失效。

### 1. 信息系统模型

配电网CPS中,信息的传输过程可表示为:配电网中的节点出现故障时,信息系统采集到故障信息并切除该线路,同时上传该故障信息至调度中心,调度中心判断故障类型后,发出调整发电机出力及切除负荷的指令,相应信息节点和物理节点开始执行调度中心指令。

信息系统可分为三层,有物理层、应用层和网络层。物理层由各类IED组成,负责采集物理系统信息并上传至信息系统。应用层位于配电主站,负

责执行信息系统下发的命令和人机交互。网络层负责连接配电主站和配电终端,包含多种通信网络和通信方式。

在本文中,假设信息系统自身完全可靠,只考虑通信系统对配电网CPS的可靠性影响。

### 2. 电力物理网模型

电力物理网可靠性主要从以下三个方面进行计算。

#### (1) 平均故障率 $\lambda$

$\lambda$ 是指在一年时间内,由于电网的故障而引起的系统负荷点平均停电次数的期望,单位为次/年。由定义可知, $\lambda$ 越小,说明电网停电次数越少,故障可靠性越高。

#### (2) 年平均停电时间 $U$

$U$ 是指一年时间内系统负荷点停电时间的总和,单位为小时/年。由定义可知, $U$ 越小,说明在一年内负荷点的平均停电时间越少,因而系统就越可靠。

#### (3) 平均每次停电持续时间 $\gamma$

$\gamma$ 是指一段时间内,系统总停电时间与总停电次数的比值,单位为小时/次。由定义可知, $\gamma$ 值越小,每次故障的停电持续时间越短,系统就越可靠。

$\lambda$ 、 $U$ 和 $\gamma$ 之间存在以下关系

$$U = \lambda \gamma \quad (3)$$

故而有

$$SAIFI = \frac{\sum_{j \in R} \lambda_j N_j}{\sum_{j \in R} N_j} \quad (4)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{j \in R} U_j N_j}{\sum_{j \in R} N_j} \quad (5)$$

$$CAIDI = \frac{\sum_{j \in R} U_j N_j}{\sum_{j \in R} \lambda_j N_j} \quad (6)$$

$$ASAI = \frac{\sum_{j \in R} 8760 N_j - \sum_{j \in R} U_j N_j}{\sum_{j \in R} 8760 N_j} \quad (7)$$

式中, $\lambda_j$ 是编号为 $j$ 的负荷点的平均故障率; $N_j$ 是编号为 $j$ 的负荷点的用户数; $R$ 是所有负荷的集合; $U_j$ 是编号为 $j$ 的负荷点的年平均停电持续时间。

### 3. 配电网CPS信息-电力相互作用关系

当信息节点可靠而物理节点故障时,IED采集

故障信息并上传到信息系统，由信息系统调度中心判断处理方案，电力工作人员根据实际情况进行相应操作以恢复供电。当物理节点可靠而信息节点故障时，通信系统的故障可能会导致或扩大电力物理网的故障，这时应首先对信息系统进行修复。

## 考虑风电出力的配电网CPS可靠性研究模型

在一次能源越来越紧张的时代，开发利用可再生能源已成为不可忽视的一部分。可再生能源分布广、污染小，属于清洁能源，非常适合现代社会发展的需要。但与此同时，分布式电源的接入会造成配电网的频率波动，因此考虑分布式电源接入配电网的CPS可靠性评估具有重要现实意义。风电是分布式电源的一种，本节针风电出力给配电网造成的不确定性，对考虑风电出力的配电网CPS可靠性进行研究。

风电出力特性及概率模型由于风电出力多少与风速大小存在一定的函数关系，而风速大小存在不确定性，因而风电出力也存在着很大不确定性，会造成风电并网后系统电力调度困难或系统偏离稳定运行点运行。将某一风电场在一个月内的实际出力用柱形图表示，如图3所示，横坐标为时刻，单位为每5 min，纵坐标代表风电出力大小，单位为MW。

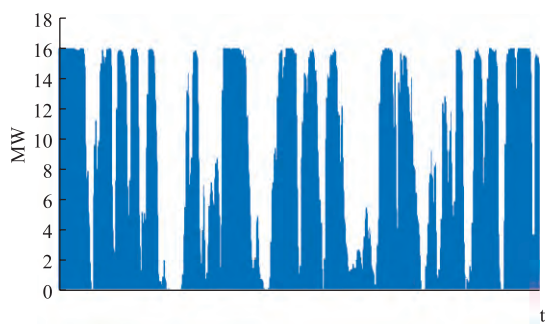


图3 某一风电场在一个月内的实际出力图

风速是决定分布式风电出力的主要因素，二者关系表示为

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_t \leq v_i \text{ 且 } v_t \geq v_o \\ av_t + b & v_i \leq v_t \leq v_r \\ P_N & v_r \leq v_t \leq v_o \end{cases} \quad (8)$$

$$a = \frac{P_N}{v_o - v_i}$$

$$b = -av_i$$

式中， $P_{wt}$ 、 $P_N$ 为输出功率、额定功率； $v_t$ 为风速；

$v_r$ 、 $v_i$ 、 $v_o$ 分别为风机的额定风速、切入和切除风速。

在一定时段下，风速可用威布尔分布表示为

$$Fv(v) = 1 - \exp[-(\frac{v}{c})^k], \quad v \geq 0 \quad (9)$$

式中， $k$ 表示形状系数； $c$ 表示威布尔分布的尺度参数值。

当 $v_i < v_t < v_r$ 时，风电输出功率 $P_{wt}$ 概率密度函数为

$$f_{P_{wt}}(P_{wt}) = \frac{khv_i}{P_N c} [1 + \frac{hp_{wt}}{P_N} v_i / c]^{k-1} \exp[-(1 + \frac{hp_{wt}}{P_N} v_i / c)^k] \quad (10)$$

式中， $h = (v_r / v_i) - 1$ 。

则有概率 $P$ 为

$$P(P_{wt} = 0) = P(v < v_i) + P(v \geq v_o) \\ = 1 - \exp[-(\frac{v_i}{c})^k] + \exp[-(\frac{v_o}{c})^k] \quad (11)$$

$$P(P_{wt} = w_r) = P(v_r < v < v_o) = \exp[-(\frac{v_r}{c})^k] - \exp[-(\frac{v_o}{c})^k] \quad (12)$$

将式(10)进行积分计算得到

$$\phi_{P_{wt}} = \exp[-(\frac{v_i}{c})^k] - \exp[-(1 + \frac{hp_{wt}}{P_N} v_i / c)^k] \quad (13)$$

$$P(P_{wt} > w_r) = 0 \quad (14)$$

综上，有 $P_{wt}$ 的概率分布函数为

$$F_{P_{wt}}(P_{wt}) = P(P_{wt} \leq w) \\ = \begin{cases} 0 & P_{wt} < 0 \\ 1 - \exp[-(1 + \frac{hp_{wt}}{P_N} v_i / c)^k] + \exp[-(\frac{v_o}{c})^k] & 0 \leq P_{wt} \leq P_N \\ 1 & P_{wt} \geq P_N \end{cases} \quad (15)$$

分布式风机发电特性如图4所示。

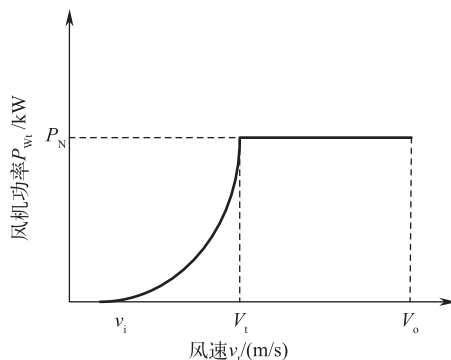


图4 分布式风机发电特性图

## 算例分析

### 1. 配电网CPS结构

配电网CPS中，信息系统由IED、服务器、应

用平台、通信链路和通信协议组成，系统中信息-物理交互主要过程为：

- 1) 首先由IED读取物理设备上传感器感受、传递的变化信息。
- 2) 将读取到的信息上传给信息系统。
- 3) 信息系统服务器接收信息后，作出判断，生成控制指令，并下发到IED终端。
- 4) IED控制物理系统目标设备使其状态改变，达到改变物理系统的目的。

整个交互过程为“物理-信息-物理”的闭环控制。建立配电网CPS可靠性模型，整个系统共包含5个交换机控制区域，不同信息系统结构示意图如图5~图7所示。

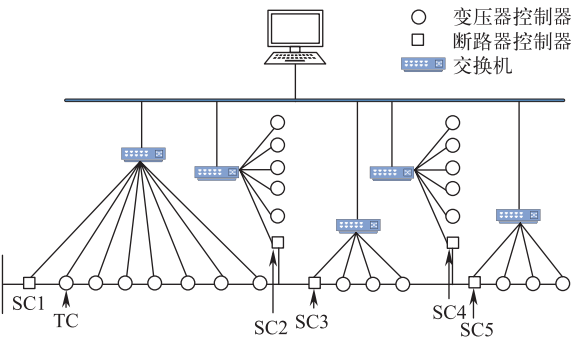


图5 信息系统为总线形结构

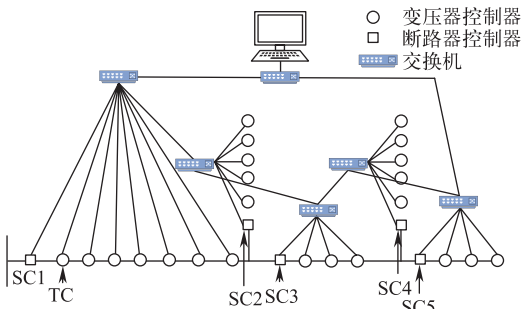


图6 信息系统为环形结构

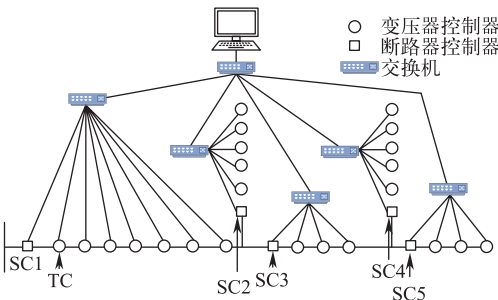


图7 信息系统为星形结构

本文采用蒙特卡洛法进行配电网CPS可靠性研究。

2. 仿真算例

(1) 考虑信息系统影响的配电网信息物理系统可靠性研究仿真

对不考虑信息系统、不同通信系统结构及不同信息系统元件MTTF对系统可靠性的影响进行分析。

CASE 1：不考虑信息系统作用，单独对电力物理系统进行可靠性评估。

CASE 2：通信系统结构为总线形，同时考虑信息系统失效和电力物理系统元件失效。

CASE 3：通信系统结构为环形，同时考虑信息系统失效和电力物理系统元件失效。

CASE 4：通信系统结构为星形，同时考虑信息系统失效和电力物理系统元件失效。

CASE 5：通信系统结构为星形，将主机的MTTF增加30%，计算配电网CPS可靠性指标。

CASE 6：通信系统结构为星形，将交换机的MTTF增加30%，计算配电网CPS可靠性指标。

CASE 7：通信系统结构为星形，将通信线路的MTTF增加30%，计算配电网CPS可靠性指标。

CASE 8：通信系统结构为星形，将控制器的MTTF增加30%，计算配电网CPS可靠性指标。

对CASE 1~CASE 8的8种情况进行仿真分析，结果见表1。

表1 CASE1~8中配电网CPS的可靠性

| 情况     | SAIDI    | SAIFI   | ASAI    | EENS      | CAIDI   | 用时/s      |
|--------|----------|---------|---------|-----------|---------|-----------|
| CASE 1 | 0.207 50 | 1.769 2 | 1.000 0 | 0.001 200 | 0.117 3 | 160.004 5 |
| CASE 2 | 0.051 47 | 0.026 4 | 1.000 0 | 0.000 832 | 0.325 4 | 165.796 9 |
| CASE 3 | 0.021 61 | 0.050 3 | 1.000 0 | 0.000 640 | 0.330 0 | 228.230 6 |
| CASE 4 | 0.011 94 | 0.017 7 | 1.000 0 | 0.000 254 | 0.127 4 | 171.226 8 |
| CASE 5 | 0.011 20 | 0.047 7 | 1.000 0 | 0.000 431 | 0.015 0 | 177.237 0 |
| CASE 6 | 0.002 99 | 0.034 2 | 1.000 0 | 0.000 365 | 0.015 0 | 162.053 1 |
| CASE 7 | 0.002 58 | 0.036 7 | 1.000 0 | 0.000 282 | 0.010 7 | 117.134 8 |
| CASE 8 | 0.012 57 | 0.047 7 | 1.000 0 | 0.000 485 | 0.010 7 | 121.652 9 |

仿真结果表明，考虑信息系统对配电网CPS的影响时，配电网的可靠性显著下降，同时信息系统的不同结构也会影响配电网CPS的可靠性，当通信系统为星形结构时，配电网CPS的可靠性显著增加；而信息系统设备如主机、控制器的故障率改变会引起配电网CPS可靠性的较大变化，以控制器的

故障率变化影响最为明显。

(2) 考虑风电出力的配电网CPS可靠性研究仿真

在馈线末端接入两台风机，每台风机容量为4 MW。平均风速为8.67 m/s。

物理系统元件的可靠性参数见表2。

表2 元件可靠性参数

| 元件    | 故障率 $\lambda$ | 修复率 $\gamma$ |
|-------|---------------|--------------|
| 断路器   | 0.05          | 1/48         |
| 风力发电机 | 0.03          | 1/48         |
| 线路    | 0.006         | 1/48         |
| 变压器   | 0.15          | 1/48         |

CASE 9：只考虑信息系统影响的配电网CPS可

靠性研究。

CASE 10：信息系统完全可靠，只考虑风机接入影响的配电网CPS可靠性研究。

CASE 11：考虑不同风机接入容量时，进行考虑风机接入影响的配电网CPS可靠性研究。

可靠性指标计算结果见表3。

表3 系统可靠性指标计算结果

| 情况      | SAIDI     | SAIFI    | ASAI    | EENS      | CAIDI   | 用时/s      |
|---------|-----------|----------|---------|-----------|---------|-----------|
| CASE 9  | 0.007 244 | 0.010 24 | 1.000 0 | 0.000 498 | 0.022 5 | 331.210 6 |
| CASE 10 | 0.008 886 | 0.017 78 | 1.000 0 | 0.000 635 | 0.035 8 | 290.562 4 |

CASE 11中，不同接入风机容量下的系统可靠性相关指标计算结果见表4。

表4 可靠性指标计算结果

| 情况      | 容量/MW | SAIDI    | SAIFI    | ASAI    | EENS      | CAIDI   | 用时/s      |
|---------|-------|----------|----------|---------|-----------|---------|-----------|
| CASE 11 | 4     | 0.025 87 | 0.028 48 | 1.000 0 | 0.000 376 | 0.068 6 | 412.185 3 |
| CASE 11 | 6     | 0.023 01 | 0.025 54 | 1.000 0 | 0.000 335 | 0.068 3 | 411.514 8 |
| CASE 11 | 8     | 0.022 00 | 0.024 44 | 1.000 0 | 0.000 242 | 0.068 1 | 380.312 7 |
| CASE 11 | 10    | 0.021 60 | 0.023 81 | 1.000 0 | 0.000 227 | 0.067 9 | 481.193 2 |
| CASE 11 | 12    | 0.021 59 | 0.023 79 | 1.000 0 | 0.000 224 | 0.067 8 | 459.154 7 |

考虑风电出力影响时，SAIDI、SAIFI、EENS和CAIDI指标分别上升为22.67%、73.63%、27.51%和59.11%，考虑信息系统影响的配电网CPS可靠性显著下降。

在对CASE 11的仿真中可以看出，随着风机容量的增大，对系统可靠性的改善趋于饱和，但在一定范围内，增大风机容量可明显提高配电网CPS的可靠性。

大时，对系统可靠性的改善趋于饱和。但在一定范围内，增大风机容量可显著提高配电网CPS的可靠性。

综上，配电网CPS的可靠性由许多因素共同决定，应当综合各方面和各种指标来考虑。在进行配电网CPS规划设计时，要重点关注主要影响因素，采取有效措施以提高配电网运行的可靠性。EA

(收稿日期：2022-03-10)

结束语

在配电网CPS中，信息系统的加入会使传统配电网的可靠性显著下降，在本文对不同信息系统结构和信息系统元件MTTF对配电网CPS可靠性研究的仿真中，发现主机和控制器在众多信息系统设备的影响中是尤为显著的，以控制器的影响最为明显，因此，在配电网CPS设计过程中要重点关注控制器的故障率。

针对风电出力不确定性，本文研究了风电出力对配电网CPS可靠性的影响，以仿真结果展示了风电出力对配电网CPS可靠性的影响因素，而风机容量与渗透率也会影响系统的可靠性，当风机容量增

参考文献

[1] 梁云，刘世栋，郭经红. 电网信息物理融合系统关键问题综述[J]. 智能电网, 2015, 3(12): 1108-1111.

[2] 郭庆来，辛蜀骏，孙宏斌，等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估：驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489.

[3] 陈雨. 电力信息物理系统的连锁故障建模与可靠性分析[D]. 长沙：湖南大学, 2019.

[4] 蒋家祥，倪铭伟. 计及用能权的电力系统经济调度[J]. 电气应用, 2020, 40 (5) : 82-87.