

# 考虑主网与变电站主接线影响的配电网可靠性评估

许鹏程<sup>1</sup>, 陈 启<sup>2</sup>, 刘宗歧<sup>1</sup>, 金秋龙<sup>1</sup>, 刘文霞<sup>1</sup>, 曹 斌<sup>3</sup>, 王 舒<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网浙江省电力公司宁波市供电公司, 浙江宁波 315012;  
3. 四川电力设计咨询有限公司, 四川成都 610016)

## Reliability Assessment of Distribution Network Considering the Influence of Transmission System and Substations

XU Pengcheng<sup>1</sup>, CHEN Qi<sup>2</sup>, LIU Zongqi<sup>1</sup>, JIN Qiulong<sup>1</sup>, LIU Wenxia<sup>1</sup>, CAO Bin<sup>3</sup>, WANG Shu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Ningbo Electric Power Bureau, Ningbo 315012, China;  
3. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., LTD., Chengdu 610016, China)

**摘 要:** 传统电力系统可靠性评估均基于各自电压等级单独计算, 虽能够发现各级电网的薄弱点, 但不能体现上下级电网间的相互影响。本文考虑了主网影响和不同变电站主接线模式, 建立了一种自上而下的全电压等级的可靠性评估方法, 从而实现考虑上级电网影响的配电网可靠性评估, 并以实际电网为算例, 分别计算传统可靠性评估和全电压等级可靠性评估的系统可靠性指标。计算结果表明, 本文提出的全电压等级的可靠性评估方法所计算的指标更能真实反映用户实际供电可靠性水平。最后, 通过对比不同变电站接线模式下用户可靠性指标, 分析了接线优化对用户可靠性的影响。

**关键词:** 全电压等级; 配电网; 主网; 主接线; 可靠性评估

**Abstract:** Traditional reliability assessment methods of power system are based on their respective voltage grade, the weak spot of their own system can be discovered in this way, but it can't reflect the interaction between transmission system and distribution system. Considering the effect of transmission system and substation main electrical wiring, a top-down approach about overall voltage level reliability assessment is proposed in this paper. Taking an actual grid as example, the result shows that reliability index which is calculated by proposed method can truly reflect the power supply reliability level. Through the comparison of users' reliability index, the influence of different substation main electrical wiring is analyzed.

**Keywords:** overall voltage level; distribution network; transmission system; substation main electrical wiring; reliability assessment

## 0 引 言

电力系统可靠性是对电力系统按可接受的质量

标准和所需要数量不间断地向电力用户供应电力和电能的度量<sup>[1]</sup>, 度量指标最终反映在电力用户侧。目前, 电力系统的可靠性评估分为若干个子系统, 如电源系统、变电所电气主接线系统<sup>[2]</sup>、发输系统和配电系统。然而子系统的独立评估却存在以下弊端: 一方面, 各个子系统独立的可靠性评估与规划, 虽能够发现各系统的薄弱点, 但不能体现子系统间的相互支撑与协调, 现阶段电网规划主要考量各电压等级的整体投资和用户供电可靠性之间的平衡, 独立的规划往往追求各自子系统的高可靠性, 增大了系统整体投资<sup>[3-4]</sup>。另一方面, 在子系统(特别是配电网)可靠性评估的过程中, 往往假定其他系统完全可靠。例如配电网的评估中假定主网以及 110kV 高压配网完全可靠, 不计及上述系统可靠性对其影响, 不区分不同供电通道(输电网)的可靠性水平差异, 这会使得评估结果过于冒进。因此, 对电网供电可靠性的研究和计算有必要将衔接部分的子系统, 如发输系统可靠性、变电站主接线系统等因素统一考虑。

对全电压等级可靠性评估研究中, 文献 [5] 提出将主网可靠性计算结果等效至配电网电源可靠性参数上, 由此进行配网的可靠性评估; 在此基础上, 文献 [6] 考虑了隔离装置共模停运影响, 建立变电站主接线的等效模型, 提出了包含变电站主接线设备的多电压等级可靠性评估方法。本文提出面向全电压等级的供电可靠性评估方法, 该方法同时考虑主网、变电站主接线和配电网, 依据电力系统物理拓扑连接关系和特点, 建立自上而下全电压

等级可靠性评估流程。其主要思想为：在对发输电网可靠性评估的基础上，取得系统和相关节点的可靠性指标(如：失负荷频率、平均持续时间等)，并将其等效至配电网电源上；再考虑高压配电网的网络和变电站的电气接线形式，对配电网可靠性进行全面评估。

### 1 上下级电网可靠性接口物理模型

在全电压等级可靠性评估中，上下级电网之间的可靠性接口通过串联关系衔接：发输电系统与高压配电网的可靠性接口是从高压配电网上级变电站(220kV)的低压侧起始，与高压配电网起始出线的衔接，形成一个复合元件；高压配电网与中压配电网的可靠性接口是从高压配电网变电站的低压侧起始，与中压配电网起始出线的衔接，形成一个复合元件。复合元件的可靠性模型与两个元件串联后的等效模型相似，求解公式<sup>[7]</sup>如下：

$$\lambda_{H\_L} = \lambda_{H\_system} + \lambda_{L\_Line} \tag{1}$$

$$\mu_{H\_L} = \frac{\lambda_{H\_L}}{\frac{\lambda_{H\_system}}{\mu_{H\_system}} + \frac{\lambda_{L\_line}}{\mu_{L\_line}}} \tag{2}$$

式中： $\lambda_{H\_L}$ 、 $\mu_{H\_L}$ 分别代表串联后复合元件的故障率和修复率； $\lambda_{H\_system}$ 、 $\mu_{H\_system}$ 分别代表上级电网的故障率和修复率； $\lambda_{L\_line}$ 、 $\mu_{L\_line}$ 分别代表下级电网起始出线的故障率和修复率。

### 2 全电压等级可靠性评估过程

面向全电压等级的供电可靠性评估范围涵盖主网、110kV 变电站和中压配电网系统，其基本环节包括发输电系统可靠性评估、考虑主网影响和 110kV 变电站主接线的高压配电网可靠性评估、计及上级电网可靠性的中压配电网可靠性评估等三部分。

评估过程中首先对主网部分(220kV 及其以上电压等级电网)进行可靠性评估，在完成发输电系统可靠性计算后，将其可靠性计算结果简化并等效于高压配电网的电源母线上，然后根据不同的变电站主接线方式进行高压配电网的可靠性评估。

本文以双辐射网架结构的 110kV 高压配电网为例，其主接线为单母分段的接线模式，具体阐述计及主网影响和变电站主接线的可靠性评估过程，其它类型接线模式均可同理计算。

如图 1 所示，将主网的可靠性参数通过发输电

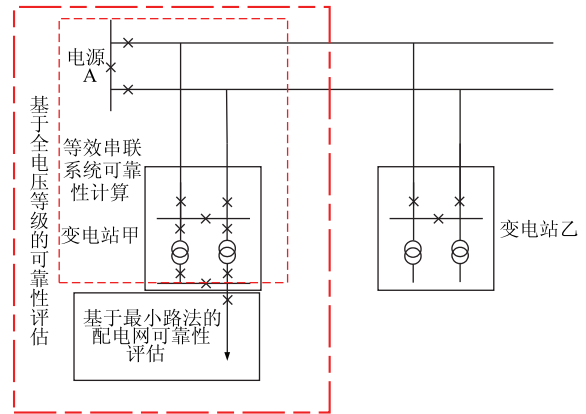


图 1 单侧电源双回供电高压配电网

系统与高压配电网可靠性接口等效至电源 A，可分别求得电源母线上可靠性参数 $\lambda_{H\_L}$ 、 $\mu_{H\_L}$ ，在此基础上对图中所示的变电站主接线方式下高压配电网进行可靠性评估，具体计算步骤如下：

①建立可靠性框图：将电气主接线图转化为表征各元器件功能关系的可靠性框图。考虑故障停电与检修停电两种情况，二者可靠性框图如下：  
 a. 由母线、电源、输电线路这些关键元器件的突发扩大性故障引起的共同失效模式。共同失效模式为某一元件发生故障时会引起相邻元器件同时失效的一种情况，例如变压器故障后，引起串联的断路器开断进入非正常工作状态。共同失效为可靠性框图化简时候的重要依据。  
 b. 特殊接线方式，主要研究因为停运检修整个接线的可靠性，因此可依据停运检修运行方式对可靠性框图做适当化简。现以图 1 中电源 A 至变电站甲为例，建立元件故障停电情景下可靠性框图如图 2 所示。

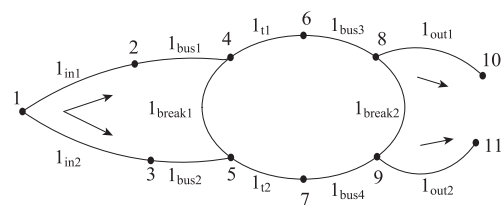


图 2 110kV 电网衔接接线可靠性计算框图

②求取电源点到负荷点之间的最小路：最小路是基本供电通路，应保证路中任一元件故障时，该路断开。与配电网不同，由于变电站运行方式的多样，电源点到负荷点之间的最小路往往不唯一。最小路可通过网络的联络矩阵求取：设网络节点矩阵为 C，网络矩阵的行代表到达的节点编号，列代表

出发的节点编号。联络矩阵元素定义如下:

$$c_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{若节点 } i, j \text{ 间无弧直接相连} \\ 1 & \text{若节点 } i, j \text{ 间有弧 } l \text{ 相连} \end{cases} \quad (3)$$

根据所定义的联络矩阵,结合图2中110kV电网衔接接线的可靠性框图,采用深度优先遍历算法<sup>[8]</sup>搜索电源点至每个负荷点的最小路。现以负荷点11为例,求得其最小路如式(4),式中 $L_1 \sim L_4$ 为第1~4条最小复合路。

$$\begin{bmatrix} l_{in1} & l_{in2} & l_{bus1} & l_{bus2} & l_{break1} & l_{t1} & l_{t2} & l_{bus3} & l_{bus4} & l_{break2} & l_{out1} & l_{out2} \\ \left[ \begin{array}{cccccccccccc} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right] & \begin{array}{l} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{array} \end{bmatrix} \quad (4)$$

③基于系统运行方式进行最小路组合:在计及全电压等级电网可靠性计算中,系统运行方式的改变对应变电站运行方式的改变,故应给定变电站当前的运行方式。由于上述求得的最小路仅为两点间单一通路的集合,并没有计及电力系统的运行方式以及负荷转供等因素,故应给出系统的运行方式,进行最小路的组合。

现以110kV变电站常用的运行方式为例进行最小路组合,其运行模式为:一备用进线;高压侧母联断路器闭合,低压侧母联断路器开断,避免电磁环网的形成;两台变压器线路并列工作。特别需要注意的是,由于110kV线路故障导致的一路断路器跳开,变电站需要进行负荷转移,但考虑变压器本身的负载情况,可设置负荷转移率为系统平均转移率,本文假设负荷平均转移率为40%。

对上述求得的最小路进行组合,得到系统在该运行方式下系统的最小路。记该运行方式下的最小路为最小复合路,则最终求得其最小复合路为

$$\begin{bmatrix} l_{in1} & l_{in2} & l_{bus1} & l_{bus2} & l_{break1} & l_{t1} & l_{t2} & l_{bus3} & l_{bus4} & l_{break2} & l_{out1} & l_{out2} \\ \left[ \begin{array}{cccccccccccc} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right] & \begin{array}{l} L_1 \\ L_2 \end{array} \end{bmatrix} \quad (5)$$

④计及检修时对中压配网最小路法叠加修正:上述输电网可靠性模型拼接过程中采用的是最小路法中的故障停电模式,如果需要对中压配电网计及预安排检修的可靠性计算,需从第一步可靠性框图的建立开始,对变电站的运行方式做相应的修改,然后重复上述步骤求得配网检修下系统的故障率、修复率等参数,最后整合故障和预安排停电的综合电网可靠

性参数,并将其等效于中压配电网的电源侧。

⑤计算系统的可靠性指标:通过上述分析可以求得系统正常工作的概率 $P_s$ 和系统不可用率 $Q_s$ 如下:

$$P_s = \sum_{i=1}^N P(L_i) \quad (6)$$

$$Q_s = 1 - P_s \quad (7)$$

式中: $L_i$ 为第 $i$ 条最小复合路。

系统故障频率 $f_s$ :

$$f_s = \sum_{i=1}^N P(L_i)(\lambda_i - \mu_i) \quad (8)$$

式中: $\lambda_i$ 为最小复合路 $L_i$ 的故障率; $\mu_i$ 为最小复合路 $L_i$ 的故障修复率。那么系统的故障率 $\lambda_s$ 和修复率 $\mu_s$ 如下:

$$\lambda_s = \frac{f_s}{P_s} \quad (9)$$

$$\mu_s = \frac{f_s}{Q_s} \quad (10)$$

在完成高压配电网可靠性评估后,将计算结果通过高压配电网与中压配电网的接口模型简化等值于中压配电网电源母线上,最后采用最小路法对计及主网影响和变电站主接线等值后的中压配电网进行可靠性评估。

### 3 算例分析

以2014年青海省实际电网为算例,其主网最高电压等级为750kV,发输电网电压等级分别为750kV、330kV、220kV,配电网包括110kV电压等级的高压配电网以及35kV、10kV电压等级的中压配电网。

#### 3.1 系统全电压等级可靠性评估结果

采用序贯蒙特卡洛模拟法对青海省220kV及以上主网网架进行可靠性评估,并统计模拟期间内主网的切负荷频率和每次切负荷持续时间,得到2014年青海省主网部分的可靠性指标如表1所示。

表1 主网部分可靠性计算结果

可靠性指标	指标值
主网故障率/(次/a)	0.112
每次故障持续时间/(h/次)	113.24
年平均故障持续时间/(h/a)	12.717

将主网可靠性参数: $\lambda_s = 0.112$ ,  $\mu_s = 12.717$ 等效至高压配电网电源母线上,并进一步进行高压配电网网架以及变电站主接线的可靠性计算。青海地域广、负荷分散,110kV高压配电网以双辐射为主,变电站的主接线形式主要为单母线分段(77.36%)、双

母线(9.43%)和内桥接线(8.49%),分别针对上述 3 种接线形式下的高压配电网进行可靠性评估,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同变电站主接线模式下的高压配网可靠性计算

主接线方式	故障率 $\lambda$ /(次/a)	修复时间/h
双母线接线	1.486 7	15.23
单母分段接线	1.856 5	14.86
内桥接线	2.175 2	14.91

在中压配电网可靠性评估中,以青海省西宁市某地区 10kV 配电网为例,具体分析不同变电站接线模式下系统可靠性指标,该供区 10kV 架空线路有 127 条,接线模式主要以多联络和单联络为主,其中多联络线路条数 60 条,单联络线路条数 61 条,比例分别为 47.2%和 48.0%,具有故障转供能力。将 1、2 所得的主网、高压配网(以下简称上层网络)可靠性模型添加至 10kV 中压配电网母线上,采用最小路法分别计算不同情境下系统可靠性:

情景 1:主网及高压配网完全可靠;

情景 2:主网及高压配网采用实际可靠性模型。

系统可靠性指标采用系统平均停电持续时间 SAIDI (h/户·a);系统供电可用率 ASAI;系统平均停电频率 SAIFI (次/户·a);系统平均缺供电量 AENS (kWh/户·a),计算结果如表 3 所示。

表 3 不同变电站主接线下西宁某供区可靠性计算结果

系统指标	SAIDI/ (h/户·a)	ASAI/%	SAIFI/ (次/户·a)	AENS/ (kWh/户·a)
情景 1	4.254	99.951	0.458	1 126.624
情景 2				
双母线接线	4.558	99.948	0.474	1 197.539
单母分段接线	5.135	99.941	0.514	1 319.068
内桥接线	5.712	99.937	0.554	1 440.597

由表 3 可知,若不计及上级电网影响,中压配电网可靠性评估结果相对较高,不同接线模式下的高压配网对系统影响各异。以不考虑上级电网影响所计算的指标  $I_0$  为基准值,定义指标偏移量  $\Delta I = (I_1 - I_0)/I_0$ ,则根据上表的计算结果分析计算可得各指标偏移量  $\Delta I$  如表 4 所示。

表 4 可靠性指标偏移量

主接线方式	$\Delta SAIDI$ / (h/户·a)	$\Delta ASAI$ /%	$\Delta SAIFI$ / (次/户·a)	$\Delta AENS$ / (kWh/户·a)
双母线	7.15	0.002 7	3.47	6.29
单母分段	20.72	0.009 6	12.21	17.08
内桥接线	34.29	0.013 6	20.95	27.87

由表 3、4 可知,传统评估方法中,不考虑上级电网影响的可靠性评估所计算的可靠性指标最高,而全电压等级可靠性评估计算的指标均偏低,且不同主接线模式对中压配电网可靠性影响不同。其中双母线接线方式下的可靠性指标与假设 10kV 电源母线完全可靠所计算的各项指标均相差不大,因此当 110kV 变电站主接线为双母线接线形式下,中压配电网的可靠性评估可近似认为上级电网完全可靠;此外,不同主接线方式下所计算出的指标 ASAI 结果较为接近,主要由于该指标计算基数较大,且地区可靠性水平与当地负荷需求相当,因此 ASAI 变化不大;而当变电站主接线为单母分段接线和内桥接线时,由于其可靠性较低,其系统可靠性指标 SAIDI、SAIFI 和 AENS 的计算值与传统不考虑上级电网可靠性的评估结果存在较大的差异。

根据青海省电网 2014 年公布的可靠性指标:西宁该类供区系统平均停电持续时间 SAIDI 为 5.16h/a,系统平均停电频率 SAIFI 为 0.463 次/a,系统供电可用率 ASAI 为 99.941 1%。由此可知,传统评估方法中,将上层网络当作 100%可靠的可靠性评估结果偏高,而本文提出的考虑主网影响和变电站主接线的全电压等级可靠性评估结果更切合实际,所计算出的指标更合理。

### 3.2 典型用户可靠性分析及相应的接线方式优化

本文选取西宁市上述供区内某条线路上的典型用户,从负荷点可靠性的角度分析其可靠性和相应接线方式的优化。由此可分别计算不考虑上级电网影响和不同主接线方式下典型用户的供电可靠性指标,主要计算的指标有负荷点年停电频率 SAIFI-LP,次/a;负荷点平均停电持续时间 SAIDI-LP, h/a;负荷点等效系统平均停电持续时间 ESAIDI-LP, h/a;负荷点平均供电可用率 ASAI-LP 和负荷点缺供电量 ENS-LP, kWh/a,计算结果如表 5~表 7。

表 5 不考虑上级电网影响的典型用户可靠性

典型用户	SAIFI-LP/ (次/a)	SAIDI-LP/ (h/a)	ESAIDI-LP/ (h/a)	ASAI-LP/ %	ENS-LP/ (kWh/a)
A	1.249	7.718	0.773	99.912	0.613
B	1.093	7.832	0.716	99.911	0.568
C	1.181	8.382	0.065	99.904	0.052
D	0.653	3.956	0.310	99.955	0.246

表6 高压配网为双母线接线形式典型用户可靠性

典型用户	SAIFLP/ (次/a)	SAIDFLP/ (h/a)	ESAIDFLP/ (h/a)	ASAFLP/ %	ENSLP/ (kWh/a)
A	1.398	9.864	0.988	99.887	0.784
B	1.242	9.978	0.912	99.886	0.723
C	1.329	10.528	0.082	99.881	0.065
D	0.801	6.102	0.478	99.930	0.379

表7 高压配网为单母分段接线形式典型用户可靠性

典型用户	SAIFLP/ (次/a)	SAIDFLP/ (h/a)	ESAIDFLP/ (h/a)	ASAFLP/ %	ENSLP/ (kWh/a)
A	1.438	10.441	1.046	99.881	0.829
B	1.282	10.555	0.965	99.879	0.765
C	1.369	11.105	0.086	99.873	0.069
D	0.841	6.679	0.523	99.924	0.415

对表5、6、7数据分析可知:

①对于指标负荷点年停电频率 *SAIFLP*, 通过将110kV主接线从单母线分段改接为双母线, 可靠性指标将提高3.52%, 年平均停电次数下降0.04次。

②对于负荷点平均停电持续时间 *SAIDFLP*, 通过将110kV主接线从单母线分段改接为双母线, 可靠性指标将提高6.21%, 年平均停电持续时间下降0.577h/a。

③对于负荷点平均供电可用率 *ASAFLP*, 通过将110kV主接线从单母线分段改接为双母线对用电可用率指标影响并不明显, 几乎没有变化。

④对于负荷点缺供电量 *ENSLP*, 通过将110kV主接线从单母线分段改接为双母线, 可靠性指标将提高6.22%, 平均缺供电量下降0.03。

由上述分析可知, 高压配电网不同接线方式对用户可靠性指标主要体现在负荷点平均停电持续时间和负荷点缺供电量上。所选典型用户中, 用户C为某重要政府单位, 负荷等级较高, 对停电持续时间指标要求严格, 因此可以考虑优化相应的110kV变电站主接线来改善该可靠性指标。

## 4 结论

本文提出一种自上而下计及主网影响和变电站主接线的全电压等级可靠性评估方法, 并以青海省2014年实际电网作为算例计算了系统和用户可靠性指标, 得到以下结论: ①传统不考虑上级电网影响的评估方法所计算出的指标偏高, 而由本文提出的全电压等级可靠性评估方法所计算出来的指标更为合理, 与实际情况更为接近; ②是否考虑主网影

响和变电站主接线对系统供电可用率 *ASAI* 影响不大; ③当高压配电网变电站主接线为双母线方式时, 中压配电网系统级可靠性评估时可近似认为上级电网完全可靠; ④不同变电站主接线方式对用户可靠性指标的影响差异性主要体现在 *SAIDFLP* 和 *ENSLP* 上, 即优化主接线方式可显著提高该指标, 但本文未考虑改进主接线的经济代价, 为此, 后续研究工作将重点放在经济性与可靠性之间的协调优化。

## 参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 邱轩宇, 余涛, 王国平, 等. 基于控制变量法的含风电场发电系统可靠性评估 [J]. 现代电力, 2016, 33(2): 84-88.
- [3] Xiangyu K, Dazhong F, Chung T S. Economy and reliability evaluation of generating including wind energy systems [C]//Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on. IEEE, 2008: 2653-2657.
- [4] 程林, 焦岗, 田浩. 可靠性与经济性相协调的配电网规划方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 106-110.
- [5] Billinton R, Jonnavithula S. A test system for teaching overall power system reliability assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [6] 程林, 刘满君, 叶聪琪, 等. 基于变电站主接线等效模型的全电压等级可靠性评估方法 [J]. 电网技术, 2015, 39(1): 29-34.
- [7] Li W. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications [M]. John Wiley & Sons, 2014.
- [8] 郝翠娟, 秦立军, 汪莹, 等. 基于扩展公共信息模型的配电网故障诊断研究 [J]. 现代电力, 2012, 29(1): 6-9.

收稿日期: 2015-11-23

作者简介:

许鹏程(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险与可靠性评估, E-mail: ncepuxpc@163.com;

陈启(1990—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统可靠性评估方法, E-mail: qichantd@163.com;

刘宗歧(1963—), 男, 教授, 研究方向为新能源发电与智能电网技术, E-mail: 934172412@qq.com.

(责任编辑: 杨秋霞)