

# OPGW 多种接地方式综合分析

陈超, 廖民传

(广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663)

**摘要:** 目前 OPGW 光缆可采用逐塔接地、分段绝缘单点接地、全线绝缘单点接地 3 种接地方式, 不同接地方式将影响到以下几个方面: 接地方案的实现(设备及安装)、正常运行状况、故障运行状况、防雷性能、运行维护、安全可靠性等。对 OPGW 3 种接地方式进行综合分析对比, 给出了可供工程设计和运行参考的建议。

**关键词:** OPGW; 接地方案; 电能损耗; 防雷性能

**Abstract:** Three grounding methods of optical ground wire(OPGW) are adopted in ultra-high voltage transmission network, that is, grounded at every tower, grounded at one single point in one line section and grounded at one single point insulated entirely in whole line. Various aspects of OPGW projects such as the implementation of grounding equipment and installation, the normal operation condition, the fault state, lightning protection performance, operational maintenance and reliability etc. will be affected by different grounding methods. The comprehensive analysis and comparison among three grounding methods of OPGW are carried out and the suggestions are provided to the engineering design and operation for reference.

**Key words:** OPGW; grounding method; electric energy loss; lightning protection performance

中图分类号: TM862 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0073-06

## 0 引言

光纤复合架空地线(optical ground wire, OPGW)作为电网通信主干线的同时也兼具避雷线功能,在送电线路中发挥着重要的作用。目前在工程中 OPGW 基本上采用逐塔接地方式,该方式具有安装简单、运行可靠性高、便于运行维护等优点,但因沿线与大地构成回路,感应电流将在 OPGW 上产生较大的电能损耗<sup>[1-2]</sup>。分段绝缘单点接地方式,因正常运行无感应电流通路,损耗很小,但设备和接线方式略微复杂,在工程使用时需处理好运行检修时 OPGW 绝缘端感应电压偏高的问题。国内早期建设的 500 kV 线路地线大都采用全线绝缘单点接地方式<sup>[3]</sup>,该方式在运行经济性、防雷保护、降低对通信设施干扰等方面效果明显,实际工程中应做好导线换位,并注意运行维护安全事项。

## 1 OPGW 逐塔接地运行分析

### 1.1 接地方案实现

OPGW 逐塔接地方式是目前使用最广泛也最成

熟的形式,包括设备、设计、施工、运行维护都有很好的基础和运行经验,在此不再详述。

### 1.2 正常运行分析

高压送电线路正常运行时地线上的感应电压和电流包括两部分:一是导线对地线电容耦合产生的静电感应电压及电流,二是由于导线空间位置不对称对地线电磁感应产生的纵电动势及电磁感应电流。对于目前应用最多的 OPGW 逐塔接地、普通地线分段绝缘单点接地方式,静电感应在 OPGW 和普通地线产生的感应电流和损耗均很小,可忽略不计,而 OPGW 与大地构成的回路,高压线路未均匀换位时,导线磁场将在 OPGW 上感应出较大的电磁感应纵电动势和电流,由此产生较大的电能损耗。下面针对常规 500 kV 和 220 kV 线路不同导线和输送容量情况进行 OPGW 损耗计算<sup>[4-5]</sup>,计算条件见表 1~表 2,计算结果见表 3~表 6。

表 1 500 kV 常用导线截面及经济输送容量

导线截面 /mm <sup>2</sup>	4 × 400	4 × 500	4 × 630	4 × 720
普通地线截面 /mm <sup>2</sup>	120	120	150	150
OPGW 截面 /mm <sup>2</sup>	125	125	155	155
经济输送容量 /MVA · 回	1 250	1 560	1 960	2 250

注:杆塔平均呼高取 42 m(单回路)或 45 m(双回路),

土壤电阻率取  $1\ 000\ \Omega \cdot m$ , 年损耗小时数取  $5\ 000\ h$ , 双回路相序布置为逆相序。

表2 220 kV 常用导线截面及经济输送容量

导线截面 /mm <sup>2</sup>	2×300	2×400	2×630	4×300
普通地线截面 /mm <sup>2</sup>	100	100	100	100
OPGW 截面 /mm <sup>2</sup>	100	100	100	100
经济输送容量 /MVA·回	205	275	432	412

注: 杆塔平均呼高取 27 m(单回路)或 30 m(双回路), 土壤电阻率取  $1\ 000\ \Omega \cdot m$ ; 年损耗小时数取  $4\ 000\ h$ ; 双回路相序布置为逆相序。

表3 500 kV 单回路 OPGW 电磁感应纵电动势、电流及损耗

导线截面 /mm <sup>2</sup>	4×400	4×500	4×630	4×720
感应纵电动势 /( $V \cdot km^{-1}$ )	65.75	82.05	103.09	118.34
感应电流 /A	71.72	89.51	116.59	133.85
损耗 /( $kWh \cdot km^{-1} \cdot a^{-1}$ )	10 241	15 950	22 515	29 672

表4 500 kV 双回路 OPGW 电磁感应纵电动势、电流及损耗

导线截面 /mm <sup>2</sup>	4×400	4×500	4×630	4×720
感应纵电动势 /( $V \cdot km^{-1}$ )	38.15	47.63	59.83	68.68
感应电流 /A	41.60	51.93	67.62	77.63
损耗 /( $kWh \cdot km^{-1} \cdot a^{-1}$ )	3 438	5 356.8	7 554	9 954

表5 220 kV 单回路 OPGW 电磁感应纵电动势、电流及损耗

导线截面 /mm <sup>2</sup>	2×300	2×400	2×630	4×300
感应纵电动势 /( $V \cdot km^{-1}$ )	20.82	27.93	43.85	41.86
感应电流 /A	21.10	28.30	44.43	43.42
损耗 /( $kWh \cdot km^{-1} \cdot a^{-1}$ )	950	1 710	4 213	3 840

表6 220 kV 双回路 OPGW 电磁感应纵电动势、电流及损耗

导线截面 /mm <sup>2</sup>	2×300	2×400	2×630	4×300
感应纵电动势 /( $V \cdot km^{-1}$ )	12.50	16.77	26.32	25.13
感应电流 /A	12.66	16.98	26.66	25.46
损耗 /( $kWh \cdot km^{-1} \cdot a^{-1}$ )	342	615	1 516	1 382

根据当前上网电价一般在  $0.4 \sim 0.5$  元/kWh, 可计算出逐塔接地方式下, 单回 500 kV 线路 OPGW 电能损失费用约为  $5\ 000 \sim 15\ 000$  元/(km·a), 双回 500 kV 线路 OPGW 电能损失费用约为  $2\ 000 \sim 10\ 000$  元/(km·a), 单回 220 kV 线路 OPGW 电能损失费用

约为  $500 \sim 2\ 000$  元/(km·a), 双回 220 kV 线路 OPGW 电能损失费用约为  $200 \sim 700$  元/(km·a)。

### 1.3 故障情况分析

当线路出现短路故障时, 导线故障电流很大, 将在 OPGW 上感应出很高的感应电压和电流, 由于 OPGW 在设计选型时都先进行短路热稳定计算, 选取合适的型号和截面, 故短路故障一般不会对 OPGW 造成危害。

### 1.4 防雷性能分析

雷击逐塔接地 OPGW 时, 雷电流经过雷击点附近铁塔直接进入大地, 从而起到防雷保护作用。国内有关统计资料表示<sup>[1,6]</sup>: 普通地线分段绝缘单点接地、OPGW 逐塔接地方式时, OPGW 遭受雷击的次数大于普通地线遭受雷击的次数, 原因一方面在于 OPGW 与普通地线因接地方式不同, 对地电阻存在较大差异, 在遭遇雷击时, 雷电流优先选择电阻值较小的 OPGW 进行泄流; 另一方面在于逐塔接地 OPGW 上会感应出更多与雷电流先导极性相反的异性电荷, 使二者间的电场增强, 导致雷击 OPGW 更容易发生。国内还曾出现过因雷电流过大造成 OPGW 断纤、断股事故, 目前主要采取的技术措施是对 OPGW 外层绞线改用铝包钢或其他熔点更高的股线, 同时适当增大 OPGW 外径和股径。现阶段在工程中一般要求采用铝包钢材且股径  $\geq 3\ mm$ , 这样 OPGW 可满足雷击不断股。

### 1.5 运行维护分析

OPGW 逐塔接地方式引下夹具和光缆接续盒结构相对简单, 对杆塔结构外观影响较小, 一般安装在塔身 7 m 左右高度处, 易于安装维护, 对线路运行人员和通信检测人员均比较方便。逐塔接地后, 每盘 OPGW 两端引下线及接续盒上电位较低, 每基塔前一档与后一档的电磁感应电流大小相近、方向相反(图1), 从而流过铁塔和引下线及接续盒的电流很小, 不影响运行检修。

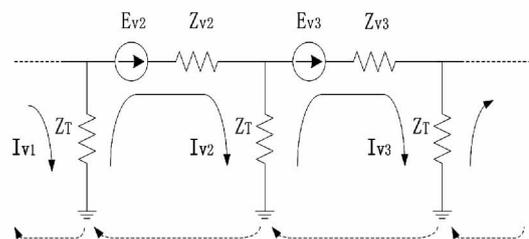


图1 OPGW 逐塔接地感应电流回路示意图

### 1.6 安全可靠

逐塔接地方式设备及安装最为简单,维护方便,运行安全可靠,为3种方式中最高。

## 2 OPGW分段绝缘单点接地运行分析

### 2.1 接地方案实现

OPGW分段绝缘单点接地可分为3种方案<sup>[6]</sup>(图2~图4所示),主要用到的设备材料包括:悬垂金具、耐张金具、防振金具、带有放电间隙的绝缘子、绝缘引下夹具、高压隔离绝缘光缆接续盒等。

方案1中,在每基OPGW接续塔一侧OPGW用绝缘夹具引下,另一侧用常规夹具接地引下,两侧OPGW在高压隔离绝缘光缆接续盒内电气隔离;

OPGW接续塔绝缘侧的OPGW和非OPGW接续塔的OPGW经带有放电间隙的绝缘子与塔头连接。

方案2中,在每基OPGW接续塔两侧OPGW均采用绝缘夹具引下,两侧OPGW在高压隔离绝缘光缆接续盒内电气隔离;选用每盘OPGW中间的1基铁塔单点接地,其他铁塔的OPGW经带有放电间隙的绝缘子与塔头连接。

方案3中,在某基OPGW接续塔两侧OPGW均采用绝缘夹具引下,两侧OPGW在高压隔离绝缘光缆接续盒内电气隔离,OPGW经带有放电间隙的绝缘子与塔头连接;在与它相邻的前后两基OPGW接续塔,两侧OPGW均采用常规夹具接地引下,采用常规光缆接续盒;其他非OPGW接续塔的OPGW经带有放电间隙的绝缘子与塔头连接。

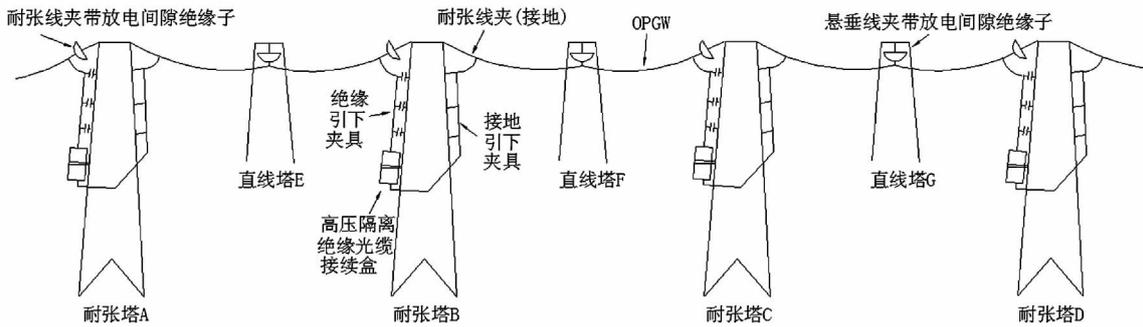


图2 OPGW分段绝缘单点接地方案1示意图

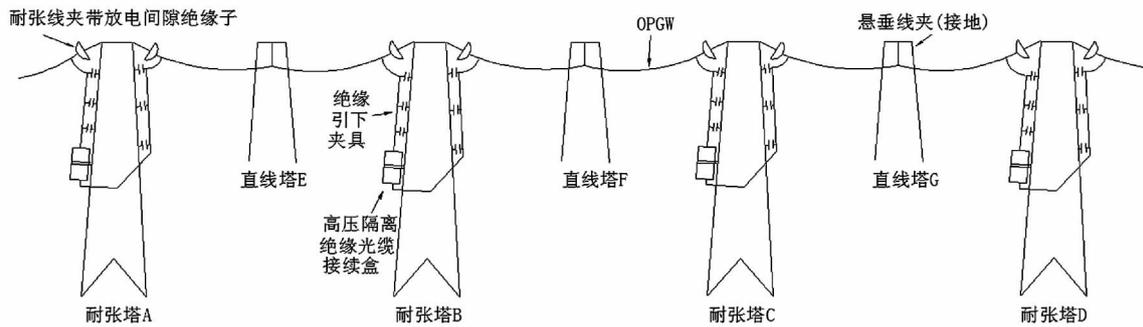


图3 OPGW分段绝缘单点接地方案2示意图



图4 OPGW分段绝缘单点接地方案3示意图

## 2.2 正常运行分析

分段绝缘单点接地时 OPGW 上只有很小的静电感应电流和电压,电磁感应因无通路所以无法形成感应电流,运行损耗很小。该方式下每盘 OPGW 绝缘端将产生较高的电磁感应电压,方案1和方案3计算结果见表7~表10,方案2因所选接地直线塔位置而异,若接地直线塔在段中附近,则 OPGW 绝缘端感应电压值约为各表数值的一半。总体来看,正常运行时 OPGW 绝缘端的感应电压较高,已超出作业人员安全电压范围。

表7 500 kV 单回路 OPGW 绝缘端电磁感应电压 /V

导线截面 /mm <sup>2</sup>	4×400	4×500	4×630	4×720
盘长4 km	263	328	412	473
盘长5 km	329	410	515	592
盘长6 km	395	492	619	710

表8 500 kV 双回路 OPGW 绝缘端电磁感应电压 /V

导线截面 /mm <sup>2</sup>	4×400	4×500	4×630	4×720
盘长4 km	153	191	239	275
盘长5 km	191	238	299	343
盘长6 km	229	286	359	412

表9 220 kV 单回路 OPGW 绝缘端电磁感应电压 /V

导线截面 /mm <sup>2</sup>	2×300	2×400	2×630	4×300
盘长4 km	83	112	175	167
盘长5 km	104	140	219	209
盘长6 km	125	168	263	251

表10 220 kV 双回路 OPGW 绝缘端电磁感应电压 /V

导线截面 /mm <sup>2</sup>	2×300	2×400	2×630	4×300
盘长4 km	50	67	105	101
盘长5 km	63	84	132	126
盘长6 km	75	101	158	151

## 2.3 故障情况分析

按500 kV 单相短路电流30 kA和220 kV 单相短路电流15 kA,计算故障时分段绝缘单点接地 OPGW 绝缘端电磁感应电压,方案1和方案3结果见表11,方案2结果约为表11的一半。

可见,线路故障时 OPGW 绝缘端感应电压很高,目前带放电间隙绝缘子的工频放电电压大多为8~30 kV<sup>[1,3]</sup>,因此间隙一般会被击穿。为使接续塔处 OPGW 绝缘引下线夹不出现放电,应保证引下

线夹金属夹持件与金属固定件之间的绝缘距离大于悬垂及耐张绝缘子的放电间隙值。

表11 单相短路时 OPGW 绝缘端电磁感应电压 /kV

线路类型	220 kV		500 kV	
	单回	双回	单回	双回
2×630			4×720	4×720
盘长4 km	22.98	23.44	43.74	43.65
盘长5 km	28.72	29.29	54.68	54.57
盘长6 km	34.47	35.15	65.61	65.48

注:计算条件为单回单相短路故障,故障相均为距 OPGW 最近相。

## 2.4 防雷性能分析

雷击分段绝缘单点接地 OPGW 系统时,悬垂或耐张绝缘子串放电间隙将首先被击穿,从而形成泄流通道。对于普通地线也采用分段绝缘单点接地方式时,理论上雷击 OPGW 和雷击普通地线的概率将相近。

## 2.5 运行维护分析

由于线路正常运行将在接续塔处 OPGW 绝缘端感应出较高的电压,运行维护时必须将杆塔两侧 OPGW 引下线临时可靠接地,运行人员方可上塔作业。

实际中,分段绝缘单点接地方式下,接线盒的安装位置仍有待商榷。若将接续盒安装在较低位置,便于通信检测人员作业,但线路运行人员每次上塔作业需经过 OPGW 引下线,所以必须先对 OPGW 引下线接地,操作较复杂且上塔仍可能存在一定危险;若接续盒安装在塔顶地线横担处,便于线路运行人员检修导线部分,但对于通信检测人员必须穿越导线横担作业,这样也有一定潜在风险。

## 2.6 安全可靠性能

分段绝缘单点接地方式的接续设备及安装比逐塔接地方式相对复杂,理论上可靠性稍低。对于运行维护需要处理好接续盒安装位置,并注意安全接地。

## 3 OPGW 全线绝缘单点接地运行分析

### 3.1 接地方案实现

全线绝缘单点接地 OPGW 系统接线方式如图5所示。需要用到的设备与分段绝缘单点接线方式相近,只是全部采用绝缘引下夹具和对塔身绝缘 OPGW 电气连通的接续盒。一点接地主要为钳制电

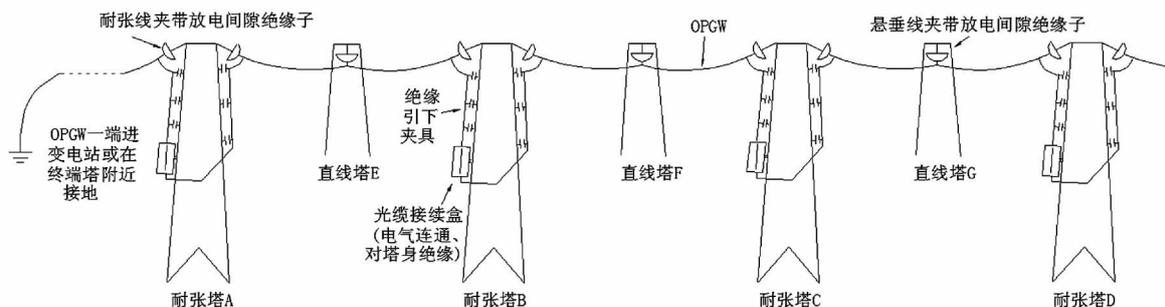


图5 OPGW 全线绝缘单点接地方式示意图

位,防止静电感应电压过高。

### 3.2 正常运行分析

全线绝缘单点接地 OPGW 系统上只有很小的静电感应电流,运行损耗很小。由于单点接地钳制电位,所以静电感应电压很小,但该方式下因 OPGW 较长,沿线将感应出较高的电磁感应纵电动势,且离接地段越远,感应电动势越高。由表 3~表 6 可推知,对于几十公里未换位线路 OPGW 绝缘端感应电势可达几千伏,对于采用导线换位和地线换位的线路,可将 OPGW 绝缘端的感应电动势控制到几十伏至几百伏<sup>[3]</sup>,具体大小因换位程度而异,但该感应电压值仍超出人员安全作业范围。

### 3.3 故障情况分析

线路发生短路故障时,因线路故障点处电磁场平衡度被严重打破,且故障时短路电流很大,OPGW 绝缘端感应电压可跃变至几十千伏,故障点处的地线绝缘子串并联间隙将被击穿放电。

### 3.4 防雷性能分析

雷击全线绝缘单点接地 OPGW 系统时,雷击点附近的悬垂或耐张绝缘子串放电间隙将先被击穿,从而形成泄流通道,起到防雷保护作用。对于普通地线采用分段绝缘单点接地方式时,理论上雷击 OPGW 次数与雷击普通地线次数相近。

### 3.5 运行维护分析

在线路带电时进行上塔作业,必须将 OPGW 绝缘引下线临时接地,此时接地附近 OPGW 上的电位可降到很低的水平(在作业人员安全范围内),但接地后 OPGW 上将形成一个环流通路,接地杆塔上将流过十几安至几十安的感应电流,具体大小取决于线路输送功率、接地点位置和导地线换位的程度,大体数值可由表 3~表 6 推出。

全线绝缘单点接地方式对线路运行人员和通信检测人员而言,也存在类似分段绝缘单点接地方式

OPGW 接续盒安装位置高低的矛盾。

此外,有资料<sup>[2]</sup>提到对 OPGW 全绝缘方式采用导弧间隙接地,正常运行时导弧间隙不被静电感应电压击穿,短路故障时或遭受雷击时,暂态电压击穿导弧间隙放电,但目前还缺乏有效数据和实际运行经验支撑,且无法回避带电检修时需要处理 OPGW 感应电压偏高的问题。

### 3.6 安全可靠性能

因全线绝缘单点方式 OPGW 必须进行换位,设备和安装接线稍微复杂一点,换位处对塔头结构和外观也略有影响。考虑到接地点只有一处,若该接地点失效将影响全线 OPGW 安全运行及维护,可靠性略低。此外 OPGW 感应电压水平与全线电磁场平衡度有关,一旦原设计的电磁场平衡被打破,如短路故障、线路开断、改线、导地线接地等,OPGW 绝缘端感应电压将发生较大变化。总体而言,全线绝缘单点接地方式具有良好的经济性与防雷性能,安全可靠性能稍低,需要做好导地线换位,处理好接续盒安装位置,并在维护检修时注意可靠接地。

## 4 结论

1) 从方案可行性来看,3 种接地方式在技术上均可以实现,其中逐塔接地方式接线相对简单,设备、施工和运行经验也十分成熟,另两种方式设备和安装略微复杂,理论上可靠性稍低,在实际工程运用中仍需一定的积累和完善。

2) 从运行经济性来看,逐塔接地方式 OPGW 电能损失远大于其他两种方式。若实际工程中科学合理的采用分段单点接地方式或全线绝缘单点接地方式,对电网节能降耗具有积极的意义。

3) 从运行维护看,逐塔接地方式安全性最高,且便于线路运行人员和通信检测人员上塔作业,而

另外两种接地方式都存在 OPGW 接线盒安装位置选取的问题,且维护检修时必须先对 OPGW 可靠接地,安全性要求较高。

参考文献

[1] 黄旭峰. 光纤复合架空地线接地方式的改进[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 356-364.  
[2] 胡毅, 刘凯. 输电线路 OPGW 接地方式的分析研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1885-1888.  
[3] 吴康平. 500 kV 线路绝缘地线的设计[J]. 电力建设, 2001, 22(11): 11-13.

[4] 张殿生主编. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
[5] 吴维韩, 张芳榴, 等著. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.  
[6] 傅宾兰. 光纤复合架空地线 OPGW 的运行状况和防雷[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 29-34.

作者简介:

陈超(1985), 男, 硕士, 研究方向为电力系统自动化;  
廖民传(1983), 男, 工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(收稿日期: 2013-03-26)

(上接第 58 页)

表 6 4 种微网方案效益的各指标值

方案	微网 1	微网 2	微网 3	微网 4
碳贸易效益 $b_1$	5 890.5	1 963.5	3 927	5 890.5
可靠性效益 $b_2$	349.3	326.4	337.9	332.6
政府补贴效益 $b_3$	8 640.8	7 992.0	7 932.0	8 640.8
售电效益 $b_4$	34 563.0	31 968.0	31 728.0	34 563.0
能耗效益 $b_5$	1 606.5	535.5	1 071.0	1 606.5
降低损耗效益 $b_6$	1 728.2	1 598.4	1 586.4	1 728.2

程度。通过对算例 4 种微网方案进行成本-效益与各自指标间的关联度分析,验证了该方法的可行性。由于废弃拆卸、治污、停电赔偿费用等指标目前尚无标准可循,算例参考相关文献确定指标值。另外分布式能源装机容量、采用技术的成熟度不同,成本差别也很大。关于微网结构及其成本-效益最优问题将在后期工作中进一步研究与探讨。

参考文献

[1] 梁惠施, 程林, 苏剑. 微网的成本效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 38-44.  
[2] DENG Ju-long. Introduction to Grey System Theory[J]. Journal of Gray System, 1988, 1(1): 1-24.  
[3] 马丽叶, 卢志刚, 常磊, 等. 基于灰色关联度的输电网经济运行指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 22-26.  
[4] 范利国, 左锋, 刘吉东, 等. 基于灰色关联度和理想解法的输电网规划综合决策研究[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(5): 38-43.

[5] 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 775-781.  
[6] 周二雄, 李凤婷, 朱贺. 基于改进层次分析法(AHP)的微网成本-效益评估[J]. 电力建设, 2013, 34(3): 1-6.  
[7] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风-光-储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.  
[8] N. H., Stavros Papathanassiou, Kai Strunz, et al. A Benchmark Low Voltage Microgrid Network[C]. In: Proceedings of CLGRE Symposium, Athens, Greece 2005: 1-8.  
[9] 叶斌. 可靠性效益评估算法以及停电损失费用最小为目标配电网重构[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.  
[10] 赵豫, 于尔铿. 新型分散式发电装置——微型燃气轮机[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 47-50.

作者简介:

周长特(1983), 男, 学士, 主要从事清洁能源发电规划与设计研究工作。

(收稿日期: 2013-06-26)