

# 特高压和超高压交流输电系统运行损耗比较分析

耿庆申<sup>1</sup>, 卢玉<sup>2</sup>, 樊海荣<sup>3</sup>, 张鹏<sup>4</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 中国电力企业联合会, 北京 100761;  
3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001; 4. 国家电网公司交流建设分公司, 北京 100052)

**摘要:** 输电系统运行损耗是影响整个输电系统经济性的重要因素。根据交流输电系统等值数学模型构建出满足同等输电能力的特高压和超高压交流输电方案, 在此基础上计算出不同情景下各输电方案的损耗率大小, 并分析了额定输送容量、输送距离和负载率变化对各输电方案损耗的影响。结果表明, 特高压在各种情景下, 均可以大幅降低运行损耗, 特别是远距离、高负载率条件下, 具有显著优势。相关结论可以为特高压和超高压交流输电的技术经济比选, 特别是为合理确定各自适用的经济区间和具有优势的输电范围提供支持。

**关键词:** 特高压交流; 超高压交流; 运行损耗; 输电能力; 比较分析

## Comparative analysis of operation losses of UHV AC and EHV AC transmission systems

GENG Qingshen<sup>1</sup>, LU Yu<sup>2</sup>, FAN Hairong<sup>3</sup>, ZHANG Peng<sup>4</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corporation, Ltd., Jinan 250013, China; 2. China Electricity Council, Beijing 100761, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;  
4. State Grid AC Engineering Construction Company, Beijing 100052, China)

**Abstract:** Transmission operating loss is an important factor affecting the economy of the whole transmission system. According to the equivalent mathematical model of AC transmission system, the UHV AC and EHV AC transmission schemes are constructed to meet the same transmission capacity, and the loss rate of each transmission scheme is calculated. It analyzes the influence of the change of the nominal transmission capacity, transmission distance and load rate on the loss rate of each transmission scheme. The results show that the characteristics of UHV in various situations can greatly reduce the operating loss, especially for long distance and high load rate. The conclusions can be used to the technical and economic comparison of UHV and EHV, especially for searching for the respective economic zone and the transmission range of advantages.

**Key words:** UHVAC; EHVAC; operating loss; line transmission capacity; comparative analysis

## 0 引言

我国幅员辽阔, 能源资源蕴藏与电力需求呈逆向分布, 其中三分之二的水资源在西南, 三分之二的煤炭资源在西北, 风电和太阳能等可再生能源也主要分布在西部、北部, 而三分之二以上的电力需求则来自资源相对匮乏的东中部地区。能源资源与电力需求分布的不平衡状况, 客观上要求对能源进行大范围内的优化配置。特高压交流输电和超高压交流输电是对能源进行优化配置, 满足电力需求的两种重要方式<sup>[1-4]</sup>。

输电系统运行损耗是影响整个输电系统经济性的重要因素。特高压和超高压交流输电系统运行损耗主要包括变电站损耗和输电线路损耗两部分, 其

中, 变电损耗包括变压器、电抗器、电容器等设备损耗及站用电等, 其损耗主要随输送容量成比例变化; 输电线路损耗主要包括电阻损耗、电晕损耗和泄漏损耗, 其中电阻损耗主要随输送容量成比例变化, 电晕损耗主要与电压等级、导线结构和天气情况有关, 泄漏损耗可忽略不计<sup>[5-8]</sup>。

理论上讲, 在输送容量、输送距离、导线总截面均相同的情况下, 1 000 kV 特高压输电系统的运行损耗仅为 500 kV 超高压输电系统的四分之一。但实际可行的满足一定输送容量和输送距离的特高压、超高压输电方案, 线路回路数和导线总截面存在较大差异, 使得同等输送能力下的特高压和超高压的损耗情况发生变化, 需要针对具体方案进行损耗分析和比较。另外, 工程投运后实际负载率的变

化将对特高压和超高压损耗差异产生直接影响, 因此, 有必要分析负载率变化对特高压和超高压输电系统损耗的影响。

## 1 同等输电能力的特高压和超高压交流输电方案

### 1.1 交流输电系统等值数学模型

交流输电系统输电能力分析采用正序模型, 送受端系统分别用相应的正序网络来等值<sup>[9-10]</sup>。在假设输电线路无损耗的条件下, 对描述输电线路基本特性的著名长线方程进行推导可以得到输送容量的关系式, 分别取线路额定电压和自然功率作为电压基准值和功率基准值, 并对线路均匀串联补偿, 得到线路输送容量的标么值方程分别为

$$p = p_s = p_r = \sqrt{\frac{1}{1-k_{sc}}} \frac{u_s u_r \sin \delta}{\sin(\beta l \sqrt{1-k_{sc}})} \quad (1)$$

$$q_s = \sqrt{\frac{1}{1-k_{sc}}} \left[ u_s^2 \cot(\beta l \sqrt{1-k_{sc}}) - \frac{u_s u_r \cos \delta}{\sin(\beta l \sqrt{1-k_{sc}})} \right] \quad (2)$$

$$q_r = \sqrt{\frac{1}{1-k_{sc}}} \left[ -u_r^2 \cot(\beta l \sqrt{1-k_{sc}}) - \frac{u_s u_r \cos \delta}{\sin(\beta l \sqrt{1-k_{sc}})} \right] \quad (3)$$

式中:  $p_s$ 、 $p_r$ 、 $q_s$ 、 $q_r$  分别为送受端功率标么值;  $u_s$ 、 $u_r$  分别为送受端电压标么值;  $\delta$  为  $\dot{U}_s$  与  $\dot{U}_r$  之间的相位角;  $\beta=0.06$  °/km 为相位常数;  $l$  为线路长度;  $k_{sc}$  为补偿度。

进一步可以得到, 送受端等值电动势  $\dot{E}_s$  和  $\dot{E}_r$  之间的相位角为

$$\delta_{sr} \approx \delta + \arctan \frac{p_s}{u_s^2 sc_{r_s}} + \arctan \frac{p_r}{u_r^2 sc_{r_r}} \quad (4)$$

式中,  $sc_{r_s}$ 、 $sc_{r_r}$  分别为送端系统和受端系统的短路比。

一旦给定输电系统的运行性能指标, 根据式(1)~式(4), 容易求出输送容量与输送距离的关系曲线。典型的运行性能指标为: 静态稳定储备系数  $K$  取 30%, 相当于两端系统等值电动势之间的额定相位角为 50.30°; 线路两端电压  $u_s$  和  $u_r$  取额定值, 即取 1; 送受端系统短路比均取 5。得出输送容量与输送距离的关系曲线如图 1 所示。

### 1.2 输电能力计算

#### 1.2.1 自然功率

输电线路自然功率计算公式如式(5)。

$$P_0 = \frac{U_0^2}{Z_0} = \frac{U_0^2}{\sqrt{L_0/C_0}} \quad (5)$$

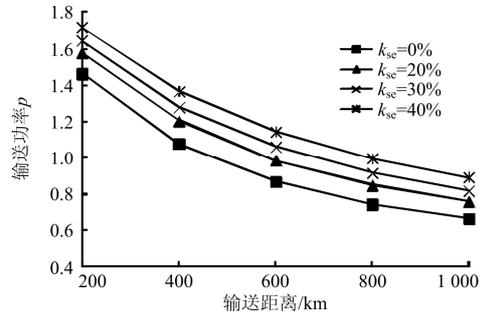


图 1 输送容量与输送距离关系曲线

Fig. 1 Relationship between transmission capacity and transmission distance

式中:  $P_0$  为输电线路的自然功率;  $U_0$  为线路额定电压;  $Z_0$  为线路波阻抗;  $L_0$  为线路单位长度电抗;  $C_0$  为线路单位长度电容。

$L_0$ 、 $C_0$  与电压等级、导线分裂数和导线截面有关系, 参照当前文献的研究结果及实际工程经验值, 特高压交流一般为 8 分裂导线, 超高压交流常规型一般为 4 分裂导线, 超高压交流紧凑型一般为 6 分裂导线, 特高压交流自然功率是超高压交流常规型的约 5 倍, 超高压交流紧凑型自然功率是常规型的约 1.3 倍<sup>[11-12]</sup>。因此, 分 1 000 kV、500 kV 常规和 500 kV 紧凑三种方案进行交流输电系统的运行损耗比较分析, 相应地自然功率按 1 000 kV、5 000 MW, 500 kV 常规型 1 000 MW 及 500 kV 紧凑型 1 300 MW 取值。

#### 1.2.2 各输电方案的输电能力

输电系统输送容量与线路自然功率的比值并不随电压等级而变化, 由上文得出的输送容量的标么值与相应输电方案的自然功率, 可以得到不同输送距离下各输电方案对应的最大输送容量, 如表 1 所示。

表 1 各输电方案的输电能力

Table 1 Transmission capacity of each transmission scheme

输电方案	补偿度/%	输送距离/km				
		200	400	600	800	1 000
1 000 kV	0	7 311	5 386	4 334	3 707	3 324
	20	7 895	6 021	4 926	4 235	3 787
	30	8 224	6 401	5 293	4 573	4 090
	40	8 583	6 833	5 724	4 978	4 460
500 kV 常规	0	1 462	1 077	867	741	665
	20	1 579	1 204	985	847	757
	30	1 645	1 280	1 059	915	818
500 kV 紧凑	40	1 717	1 367	1 145	996	892
	0	1 901	1 400	1 127	964	864
	20	2 053	1 566	1 281	1 101	985
500 kV 紧凑	30	2 138	1 664	1 376	1 189	1 063
	40	2 232	1 777	1 488	1 294	1 160

### 1.3 不同情景下的特高压和超高压输电方案

#### 1.3.1 情景设置

1 000 kV 采用 8×630 导线, 500 kV 常规型采用 4×630 导线, 500 kV 紧凑型采用 6×300 导线。1 000 kV 按输送容量的 1.3 倍配置变电容量, 只考虑降压容量, 送端设开关站, 受端变电站容量随输送容量变化。500 kV 不考虑变电投资, 送、受端均设开关站。

随着输送距离的增长, 考虑在线路中间建设开关站, 1 000 kV 每 300 km 建设一个开关站, 开关站出线规模匹配线路回路数; 500 kV 每 250 km 建设一个开关站, 开关站出线规模匹配线路回路数; 有需要时增加串补, 补偿度按 0%、20%、30%、40% 进行选择。当单回路不能满足输送容量要求时, 优先考虑增加串补。

#### 1.3.2 不同情景下的输电方案

按照特高压和超高压交流可能的输送距离范围, 输送距离选取 200 km、400 km、600 km、800 km、1 000 km 五种情景; 按照特高压和超高压交流常用的主变容量规格及容量限制, 额定输送容量选取 2 800 MW、4 000 MW、5 600 MW、8 000 MW、8 400 MW 五种情景。在此基础上, 构造出 25 种情景下采用 1 000 kV、500 kV 常规和 500 kV 紧凑的输电方案, 其中, 额定输送容量为 8 000 MW 时对应的输电方案如表 2 所示。

表 2 额定输送容量为 8 000 MW 的输电方案

Table 2 Transmission scheme for 8 000 MW

输电方案	项目类型	输送距离/km				
		200	400	600	800	1 000
主变容量 MVA		9 000	9 000	9 000	9 000	9 000
1 000 kV	变电站	1	1	1	1	1
	开关站	1	2	2	3	4
	回路数	1	2	2	2	2
	串补度	30%	0%	0%	20%	30%
500 kV 常规	开关站	2	3	4	5	5
	回路数	6	7	7	9	10
	串补度	0%	20%	40%	30%	30%
500 kV 紧凑	开关站	2	3	4	5	5
	回路数	4	6	6	7	7
	串补度	20%	0%	30%	30%	40%

## 2 特高压和超高压交流输电系统的运行损耗分析及比较

### 2.1 输电系统运行损耗分析

输电系统运行损耗可分解为变电站损耗、线路

电阻损耗和线路电晕损耗<sup>[13-14]</sup>。

#### 2.1.1 变电站损耗分析

变电站的运行损耗主要包括变压器、电抗器、电容器等设备损耗及站用电等, 其中, 主变压器损耗占变电站总损耗的 70%~85%, 因此, 变电站的运行损耗以主变压器为主<sup>[15]</sup>。特高压和超高压主变压器损耗计算参照《电力系统设计手册》, 选取典型特高压变电站和超高压变电站, 进行不同情景下的主变压器损耗分析, 结果表明 1 000 kV 和 500 kV 典型变电站损耗率分别为 0.06%~0.09%、0.09%~0.12%。综合变压器损耗在变电站总损耗中的占比情况, 1 000 kV 变电站、开关站损耗率分别取 0.10%、0.02%, 500 kV 开关站损耗率取 0.03%。

#### 2.1.2 输电线路损耗分析

##### (1) 线路电阻损耗计算

电阻损耗的计算公式为

$$\Delta P = 3n\Delta p_{\text{相}} = 3nI_{\text{相}}^2 R_{\text{相}} \quad (6)$$

式中:  $\Delta P$  为输电线路功率总损耗;  $n$  为回路数;  $\Delta p_{\text{相}}$  为每相损耗;  $I_{\text{相}}$  为相电流;  $R_{\text{相}}$  为相电阻。

$$I_{\text{相}} = \frac{P_{\text{相}}}{U} = \frac{\eta P_0}{\sqrt{3}nU} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{相}}$  为每相实际输送容量;  $U$  为额定电压;  $\eta$  为负载率;  $P_0$  为输电线路额定输送容量;  $n$  为回路数。

$$R_{\text{相}} = R_{\text{分裂}} L = \frac{R_{\text{子}}}{N} L \quad (8)$$

式中:  $R_{\text{分裂}}$  为分裂导线的交流电阻;  $R_{\text{子}}$  为子导线单位公里交流电阻;  $N$  为导线分裂数;  $L$  为线路长度。

$$R_{\text{子}} = kC_{\text{R}} R_{\text{d}} \quad (9)$$

式中:  $k$  为交直流电阻比(钢芯铝绞线为 1.047 3),  $C_{\text{R}}$  为直流电阻温度调整系数, 钢芯铝绞线为 0.004 03(1/°C), 平均运行温度按 40°C, 则  $C_{\text{R}} = 1.080 6$ ;  $R_{\text{d}}$  为子导线 20°C 直流电阻, 不同截面导线可查阅《GB/T 1179-2008 圆线同心绞架空导线》。

由式(8)、式(9)可得出 1 000 kV、500 kV 常规和 500 kV 紧凑的  $R_{\text{分裂}}$  分别为 0.006 49 Ω/km、0.012 99 Ω/km、0.017 30 Ω/km。

将各输电方案的相应参数代入式(6)~式(8), 可得出各输电方案的线路电阻损耗。

##### (2) 线路电晕损耗取值

与电阻损耗不同, 电晕损耗不随输送容量的变化而变化, 其大小主要与电压等级、导线结构和天气情况有关。对于 500 kV 超高压输电线路电晕损失

一般不超过电阻损耗的 20%，1 000 kV 特高压输电线路的输送容量较小时，电晕损耗可能会超过电阻损耗的 20%。

目前，国内超高压输电线路电晕估算大多采用拟合曲线法经验取值，即根据已建线路在不同天气条件下的电晕实测结果与导线表面最大平均场强的关系，拟合成不同天气条件下的电晕损失曲线。在新建线路导线选型时，查阅电晕损失曲线，便可估算不同导线方案的电晕损失。文献[16]对特高压交流输电线路电晕损耗进行了专门研究，给出了锡盟—南京 1 000 kV 同塔双回输电线路山东段在不同天气条件下的年平均电晕损耗值为 46.6 kW/km。文献[17]得出 1 000 kV 与 500 kV 在相同天气下的电晕损耗近似呈一定比例关系，即 1 000 kV 近似为 500 kV 的 3.72 倍。

综合以上文献成果，输电线路单回路年平均电晕损耗 1 000 kV 按 23.3 kW/km，500 kV 按 6.3 kW/km。

## 2.2 特高压和超高压输电系统运行损耗比较

根据前文设定的输电方案，将电压等级、额定输送容量、输送距离、负载率(基准值 60%)等参数代入输电系统运行损耗计算公式，得出各输电方案的损耗情况如表 3 所示。可以看出，同等输电能力下，1 000 kV 损耗率最低，500 kV 常规损耗率居中，500 kV 紧凑损耗率最大，其中，500 kV 常规损耗率是 1 000 kV 的 1.25~1.79 倍，500 kV 紧凑损耗率是 1 000 kV 的 1.77~2.92 倍。

## 2.3 特高压和超高压输电系统运行损耗构成情况

在变电站损耗、线路电阻损耗、线路电晕损耗中，线路电阻损耗占比最大，其中，1 000 kV 占比 35%~75%，500 kV 常规占比 57%~81%，500 kV 紧凑占比 69%~91%，输送容量越大，线路电阻损耗占比越大；输送距离越长，变电站损耗占比越小。

1 000 kV 线路电阻损耗明显低于 500 kV 常规和 500 kV 紧凑，是造成 1 000 kV 损耗低的主要原因。在输送容量相同的情况下，电压越高，电流越小，从而损耗越小。图 2 是额定输送容量 8 000 MW、输送距离 600 km、负载率 60%时的输电系统损耗构成情况。

## 3 主要参数变化对特高压和超高压输电系统运行损耗的影响

### 3.1 额定输送容量变化对特高压和超高压运行损耗的影响(图 3)

以输送距离 600 km、负载率 60%为基准，分析

表 3 同等输电能力下各输电方案损耗率

Table 3 Loss rate of each transmission scheme under the same transmission capacity

输送距离/km	额定输送容量/MW	1 000 kV	500 kV 常规	500 kV 紧凑
200	2 800	0.62%	1.08%	1.37%
	4 000	0.63%	1.05%	1.83%
	5 600	0.70%	1.08%	1.72%
	8 000	0.84%	1.05%	1.83%
	8 400	0.87%	1.08%	1.58%
400	2 800	1.13%	1.70%	2.71%
	4 000	1.15%	2.07%	2.62%
	5 600	1.29%	1.86%	2.71%
	8 000	1.15%	1.88%	2.62%
	8 400	1.16%	1.94%	2.71%
600	2 800	1.63%	2.54%	4.06%
	4 000	1.66%	2.62%	3.91%
	5 600	1.87%	2.78%	4.06%
	8 000	1.66%	2.81%	3.91%
	8 400	1.68%	2.68%	3.63%
800	2 800	2.14%	3.38%	4.15%
	4 000	2.18%	3.19%	3.86%
	5 600	2.14%	3.38%	4.62%
	8 000	2.18%	3.31%	4.68%
	8 400	2.21%	3.38%	4.84%
1 000	2 800	2.66%	3.83%	5.15%
	4 000	2.71%	3.96%	4.78%
	5 600	2.66%	3.96%	5.74%
	8 000	2.71%	3.96%	5.81%
	8 400	2.74%	4.02%	5.51%

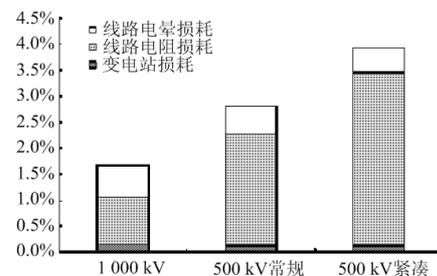


图 2 各输电方案损耗构成情况

Fig. 2 Composition of each transmission scheme

了额定输送容量变化对特高压和超高压运行损耗的影响，如图 3 所示。可以看出，特高压和超高压损耗率受额定输送容量变化影响较弱。这主要是因为当额定输送容量增大时，对应的各输电方案的线路回路数及导线总截面相应增加，使得运行损耗的增加幅度与额定输送容量的增加幅度相当，导致损耗率受额定输送容量的影响不明显。

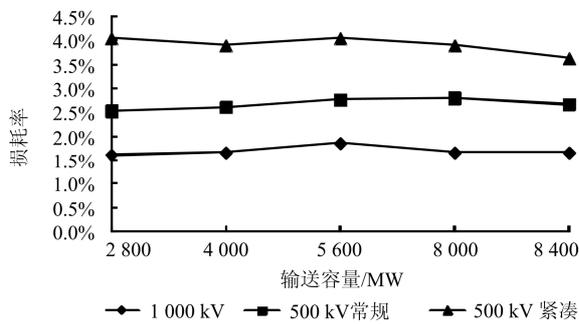


图3 额定输送容量变化对特高压和超高压运行损耗的影响  
Fig. 3 Influence of the change of nominal transmission capacity on the operating loss of UHV and EHV

### 3.2 输送距离变化对特高压和超高压运行损耗的影响

以额定输送容量 8 000 MW、负载率 60%为基准，分析了输送距离变化对特高压和超高压运行损耗的影响，如图 4 所示。可以看出，特高压和超高压损耗率均随输送距离的增大而增大，但 1 000 kV 随输送距离的增长幅度弱于 500 kV 常规，500 kV 常规随输送距离的增长幅度弱于 500 kV 紧凑。从降低电力损耗的角度，输送距离的增加将使 1 000 kV 优势更显著。

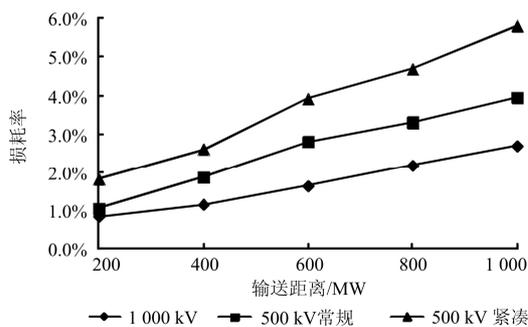


图4 输送距离变化对特高压和超高压运行损耗的影响  
Fig. 4 Influence of the change of transmission distance on the operating loss of UHV and EHV

### 3.3 负载率变化对特高压和超高压运行损耗的影响

以额定输送容量 8 000 MW、输送距离 600 km 为基准，分析了负载率变化对特高压和超高压运行损耗的影响，如图 5 所示。可以看出，特高压和超高压损耗率均随负载率的增大而增大，但 1 000 kV 随负载率的增长幅度明显弱于 500 kV 常规，500 kV 常规随负载率的增长幅度明显弱于 500 kV 紧凑。从降低电力损耗的角度，负载率的增加将使 1 000 kV 优势更显著。

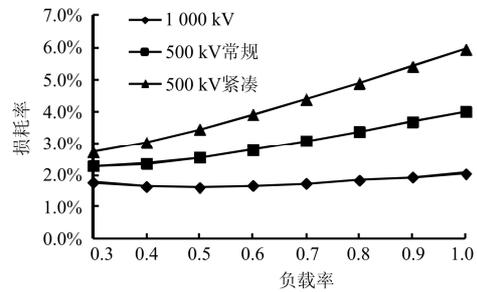


图5 负载率变化对特高压和超高压运行损耗的影响  
Fig. 5 Influence of the change of load ratio on the operating loss of UHV and EHV

## 4 结论

(1) 在特高压和超高压交流对应的同等输电能力方案下，1 000 kV 损耗率最低，500 kV 常规损耗率居中，500 kV 紧凑损耗率最大，其中，500 kV 常规损耗率是 1 000 kV 的 1.25~1.79 倍，500 kV 紧凑损耗率是 1 000 kV 的 1.77~2.92 倍，造成这种状况的主要原因是 500 kV 常规和 500 kV 紧凑线路电阻损耗明显高于 1 000 kV。

(2) 特高压和超高压损耗率受负载率和输送距离的影响较大，受额定输送容量的影响较小。特高压和超高压损耗率均随输送距离、负载率的增长而增长，但 1 000 kV 的增长幅度明显弱于 500 kV 常规，500 kV 常规的增长幅度明显弱于 500 kV 紧凑。

(3) 从降低电力损耗的角度，1 000 kV 在各种情景下，均可以大幅降低输电系统运行损耗，特别是远距离、高负载率条件下，具有显著优势。该结论可以为特高压和超高压交流输电系统的技术经济比选，特别是为确定各自适用的经济区间和具有优势的输电范围提供支持。

## 参考文献

[1] 杜至刚. 中国特高压电网发展战略规划研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.  
DU Zhigang. Study on strategic planning of ultra-high voltage grid development in China[D]. Jinan: Shandong University, 2008.

[2] 张宁, 刘静琨. 影响特高压电网运行的因素及应对策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 109-114.  
ZHANG Ning, LIU Jingkun. The ultra high voltage grid risk analysis and its assessment framework[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 109-114.

[3] 孙伟卿, 王承民, 张焰, 等. 电力系统运行均匀性分析与评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 174-180.  
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZHANG Yan, et al. Analysis and evaluation on power system operation

- homogeneity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 174-180.
- [4] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.  
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [5] 梁涵卿, 邬雄, 梁旭明. 特高压交流和高压直流输电系统运行损耗及经济性分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 630-635.  
LIANG Hanqing, WU Xiong, LIANG Xuming. Operation losses and economic evaluation of UHVAC and HVDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 630-635.
- [6] 杨昊, 王丹, 刘涤尘. 特高压交流输电模型的建立与经济性优选分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 91-96.  
YANG Hao, WANG Dan, LIU Dichen. Establishment of UHV AC transmission model and economical optimization strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 91-96.
- [7] 傅军栋, 喻勇, 黄来福. 不平衡负载的一种更加经济的补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 126-132.  
FU Jundong, YU Yong, HUANG Laifu. A more economical compensation method for unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 126-132.
- [8] 黄知超, 谢霞, 王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 65-69.  
HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [9] 柴旭峥, 梁曦东, 曾嵘. 交流输电线路输送能力曲线计算方法的改进[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 20-24.  
CHAI Xuzheng, LIANG Xidong, ZENG Rong. An improved calculation method for power-transmitting capability curve of AC transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 20-24.
- [10] 徐政. 超、特高压交流输电系统的输送能力分析[J]. 电网技术, 1995, 19(8): 7-12.  
XU Zheng. EHV/UHV AC transmission capability analysis[J]. Power System Technology, 1995, 19(8): 7-12.
- [11] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [12] 马志坚, 傅春衡. 500 kV 紧凑型输电线路技术应用研究[J]. 电力建设, 2005, 26(10): 30-33.  
MA Zhijian, FU Chunheng. Study on application of 500 kV compact-type transmission line technology[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(10): 30-33.
- [13] 董楠, 杨柳, 吴鸿亮, 等. 地区电网理论线损计算需求数据合成方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 47-53.  
DONG Nan, YANG Liu, WU Hongliang, et al. Demand data synthesis method of regional power grid theoretical line loss calculation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 47-53.
- [14] 靳玮玮, 杨兴超, 余存, 等. 功率计划在特高压直流输电工程中的传输和实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 143-147.  
JIN Weiwei, YANG Xingchao, YU Cun, et al. Transmission and realization of the power plan in UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 143-147.
- [15] 赵争菡, 汪友华, 凌跃胜, 等. 大容量高频变压器绕组损耗的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 261-264, 270.  
ZHAO Zhenghan, WANG Youhua, LING Yuesheng, et al. Calculation and analysis of loss in high transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 261-264, 270.
- [16] 刘文勋, 赵全江, 张瑚, 等. 1 000 kV 特高压交流输电线路电晕损耗估算方法[J]. 电力建设, 2011, 32(10): 27-29.  
LIU Wenxun, ZHAO Quanjiang, ZHANG Hu, et al. Study on the corona loss estimate under the 1 000 kV UHVAC transmission line[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(10): 27-29.
- [17] 谢雄杰, 刘琴, 霍锋, 等. 1 000 kV 与 500 kV 交流同塔输电线路的电晕损耗仿真及试验分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 592-596.  
XIE Xiongjie, LIU Qin, HUO Feng, et al. Simulation and experimental analysis of corona loss of 1 000 kV and 500 kV AC transmission line on same tower[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 592-596.

收稿日期: 2015-08-24; 修回日期: 2015-09-01

作者简介:

耿庆申(1982-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为特高压投资估算及经济评价; E-mail: 542618178@qq.com

卢玉(1974-), 女, 硕士, 高级经济师, 研究方向为输变电工程技术经济研究; E-mail: 1677548374@qq.com

樊海荣(1971-), 男, 学士, 高级经济师, 研究方向为输变电工程造价管理。E-mail: 1844810628@qq.com

(编辑 魏小丽)