

## 低碳经济下的微电网电源规划研究

邹国春,陈 棋,石 磊

(国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 210061)

**摘 要:**在传统电源规划的基础上,引入清洁能源发展机制(CDM),计及碳约束和碳交易等,建立低碳经济下的微电网电源规划模型,采用改进的矩阵实数编码遗传算法进行求解,在求解过程中优化了遗传算法的算子,不仅能可靠获得全局最优解,而且增大了求解规模,提高了计算速度。算例结果表明文中提出的模型和算法均合理有效。

**关键词:**微电网; 电源规划; 低碳经济; 碳交易; 矩阵实数编码遗传算法

**中图分类号:**TM715

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2011)06-0001-04

随着全球气候日益变暖,减少 CO<sub>2</sub> 排放和发展低碳经济已经成为当前研究热点。低碳经济是人类社会应对气候变化,实现经济社会可持续发展的一种模式。低碳经济兼顾了“低碳”和“经济”,低碳,意味着经济发展必须最大限度地减少或停止对一次能源燃料的依赖,实现能源利用的转型;经济,意味着要在能源利用转型的基础上继续保持经济增长的稳定和可持续性<sup>[1-4]</sup>。

作为最主要的 CO<sub>2</sub> 排放源,电力系统领域中越来越注重研究和应用各种低碳电力技术。文献[5,6]着重分析了各种清洁能源的特点以及在电力系统中大范围应用的关键技术和难点;文献[7]分析了实施 CO<sub>2</sub> 减排对电力需求侧技术的激励;文献[8,9]研究了在电源扩展中引入碳约束条件对其影响以及如何确定相应的最佳电源结构。

由于低碳电力技术对规模经济性的要求相对较低,同时国内外的 CO<sub>2</sub> 价格、碳税政策、相关的约束机制或交易机制与低碳电源投入运行产生联动,深入分析低碳经济下电力系统中新的电源结构与运行特点,已成为低碳电力研究中一个非常重要的研究方向。在综合考虑国内外研究成果的基础上,将低碳经济下的清洁能源发展机制(CDM)引入到微电网电源规划中,考虑 CO<sub>2</sub> 交易机制,计及碳约束与碳交易,建立低碳经济下的微电网电源规划模型,并采用改进的矩阵实数编码遗传算法进行求解。

## 1 数学模型

建立的数学模型基于如下假设:

(1) 仅考虑四种微电源,微型燃气轮机(MT)、燃料电池(FC)、风力发电(WT)和光伏发电(PV),其中前两种微电源消耗一次能源,这里假设为天然气。

(2) 四种微电源均为符合 CDM 的低碳电力技术。其中,前两种产生了一定量的 CO<sub>2</sub>,后两种为零

排放。

(3) 在规划过程中考虑到低碳发电技术的成熟度因素,引入了低碳发电技术成熟年的概念,认为 WT 与 PV 具有技术成熟年,而 MT 和 FC 技术已经成熟。

### 1.1 目标函数

引入低碳经济,在减少温室气体的排放的前提下,取目标函数为微电网电源总体成本最小化。

$$\min F=F_1+F_2+F_3+F_4 \quad (1)$$

式(1)中: $F_1$ 为微电网电源建设的投资费用,元; $F_2$ 为微电源发电运行与管理维护费用,元; $F_3$ 为考虑低碳经济的总费用,元; $F_4$ 为微电网与大电网运行交互费用,元。

$$F_1=\sum_{t=1}^T\left[\sum_{n=1}^N F_{1,n}^t(1+r)^{-t}\right] \quad (2)$$

式(2)中: $T$ 为考虑的总的规划年限; $N$ 为微电源的种类数目; $F_{1,n}^t$ 为新建第  $n$  类微电源在规划年  $t$  的投资费用,元; $r$ 为贴现率。

$$F_2=\sum_{t=1}^T\left[\left(F_m^t+F_f^t-H^t\right)(1+r)^{-(t-0.5)}\right] \quad (3)$$

$$F_m^t=\sum_{n=1}^N\left(C_{1,n} Q_n^t+C_{0,n}\right) \quad (4)$$

$$F_f^t=b_M C_M Q_M^t+b_F C_F Q_F^t \quad (5)$$

式(3—5)中: $F_m^t$ 为规划年  $t$  微电源的运行与管理费用,元; $F_f^t$ 为规划年  $t$  微电源的燃料费用,元; $H^t$ 为在规划年  $t$  微电源给用户供热(冷)能获得的收益,元; $C_{1,n}$ 和  $C_{0,n}$ 分别为第  $n$  种微电源的运行与管理维护系数; $Q_n^t$ 为第  $n$  种微电源在规划年  $t$  的发电量,kW·h; $b_M$ 和  $b_F$ 分别为 MT 和 FC 单位电量燃料耗率,m<sup>3</sup>/(kW·h); $C_M$ 和  $C_F$ 分别为相应的燃料单价,元/m<sup>3</sup>;  $Q_M^t$ 和  $Q_F^t$ 分别为规划年  $t$  内相应的发电量,kW·h。

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N [C_D^0 (1-r_n)^t] + \sum_{t=1}^T [f(R_{CO_2}^t) - C_T R_{CO_2}^t] \quad (6)$$

式(6)中:等号右两项的第1项为低碳电力技术研发成本投入,元;第2项为引入CO<sub>2</sub>交易机制所付出的成本,元; $C_D^0$ 为低碳发电技术的初始年技术投入成本,元; $r_n$ 为第 $n$ 类微电源年技术投入成本下降率; $R_{CO_2}^t$ 为采用低碳发电技术引起的CO<sub>2</sub>减排量,t; $f(R_{CO_2}^t)$ 为核准减排量成本,元<sup>[10]</sup>;  $C_T$ 为CDM机制下可交易的CO<sub>2</sub>减排价格,元。

$$R_{CO_2}^t = \sum_{k=1}^{N_{CDM}} e_k^C Q_k^t \quad (7)$$

$$f(R_{CO_2}^t) = a(R_{CO_2}^t)^2 + bR_{CO_2}^t \quad (8)$$

式(7,8)中: $e_k^C$ 为第 $k$ 类微电源单位发电量的CO<sub>2</sub>减排量,t/(kW·h);  $N_{CDM}$ 为符合CDM规定的低碳发电微电源种类; $a$ 和 $b$ 为常数。

$$F_4 = C_b^t \times Q_b^t - C_s^t \times Q_s^t + \sum_{\tau} C_L \Delta P^{\tau} \tau \quad (9)$$

式(9)中: $C_b^t$ 和 $C_s^t$ 分别为规划年 $t$ 内向大电网的购电价格和售电价格,元/(kW·h);  $Q_b^t$ 和 $Q_s^t$ 分别为规划年 $t$ 内向大电网的购电量和售电量,kW·h。 $\tau$ 为微电网在规划年中切负荷的时间段; $C_L$ 为切除单位低价可中断负荷的赔偿价格,元/(kW·h);  $\Delta P^{\tau}$ 为某时段切负荷的容量,kW。

## 1.2 约束条件

(1) 微电网内备用容量约束。

$$\sum_{n=1}^N P_n^t \geq (1+R_1) P_{L,max}^t \quad (10)$$

式(10)中: $P_n^t$ 为第 $n$ 种微电源在规划年 $t$ 的装机容量,kW; $R_1$ 为备用容量的百分比; $P_{L,max}^t$ 为微电网在规划年的最大负荷需求量,kW。微电网中备用分为事故备用和负荷备用两种,微电源规划容量应满足事故备用,负荷备用容量可由大电网提供。

(2) 微电网内的电量约束。

$$\sum_{n=1}^N h_n^t \times P_n^t + Q_b^t - Q_s^t \geq Q^t \quad (11)$$

式(11)中: $h_n^t$ 为微电网中第 $n$ 种微电源在规划年 $t$ 的年利用小时数,h; $Q^t$ 为微电网在规划年 $t$ 的负荷需求电量,kW·h。

(3) 微电源的投产容量约束。

$$P_{n,n}^t \leq P_{n,max}^t \quad (12)$$

式(12)中: $P_{n,n}^t$ 为第 $n$ 种微电源在规划年 $t$ 新增加的装机容量,kW; $P_{n,max}^t$ 为微电网中第 $n$ 种微电源的投产容量最大值,kW。由于施工条件及工业制造水平的制约,微电源在任意规划年的投产容量不能大于一个特定值。

(4) 微电源的上下限约束。

$$P_{n,min} \leq P_n \leq P_{n,max} \quad (13)$$

式(13)中: $P_n$ 为第 $n$ 种微电源每台机组的出力,kW; $P_{n,min}$ 和 $P_{n,max}$ 分别为微电源每台出力的下限和上限,kW。

(5) 微电网与大电网之间电量交互的约束。

$$Q_{b,min}^t \leq Q_b^t \leq Q_{b,max}^t \quad (14)$$

$$Q_{s,min}^t \leq Q_s^t \leq Q_{s,max}^t$$

式(14)中: $Q_{b,min}^t$ 和 $Q_{s,min}^t$ 分别为微电网在规划年 $t$ 从大电网购买电和出售电量的最小值,kW·h; $Q_{b,max}^t$ 和 $Q_{s,max}^t$ 分别为微电网在规划年 $t$ 从大电网购买电量和出售电量的最大值,kW·h。

(6) 技术成熟年的约束。

$$P_n^t = 0, t < T_n \quad (15)$$

式(15)中: $T_n$ 为微电网中第 $n$ 种微电源的技术成熟年,表示第 $n$ 种微电源在 $T_n$ 年因为技术成熟后才可以用于发电。

(7) 碳排放约束。

$$\sum_{n=1}^N e_n Q_n^t \leq E^t \quad (16)$$

式(16)中: $e_n$ 为第 $n$ 种微电源产生单位电量的CO<sub>2</sub>排放量,t/(kW·h);  $E^t$ 为规划年 $t$ 政府规定的CO<sub>2</sub>总排放量,t。

式(1—16)构成了低碳经济下微电网电源规划的优化数学模型,控制变量包括 $P_n^t$ 、 $Q_b^t$ 、 $Q_s^t$ 和 $\Delta P^{\tau}$ 。

## 2 求解方法

采用二维实数矩阵对所制定的微电网电源规划方案进行编码,从而可以直接应用遗传算法进行寻优<sup>[11]</sup>。同时,为了使矩阵实数编码遗传算法在更大的搜索空间寻找最优解,采用窗口宽度分别为: $w_1=1, w_2=2, w_3=5$ 的多窗口变异操作,且每次变异操作都采用三种不同的窗口分别计算,择优作为变异结果。流程如图1所示。

## 3 算例

以文献[12—14]中的测试系统为基础构造了某

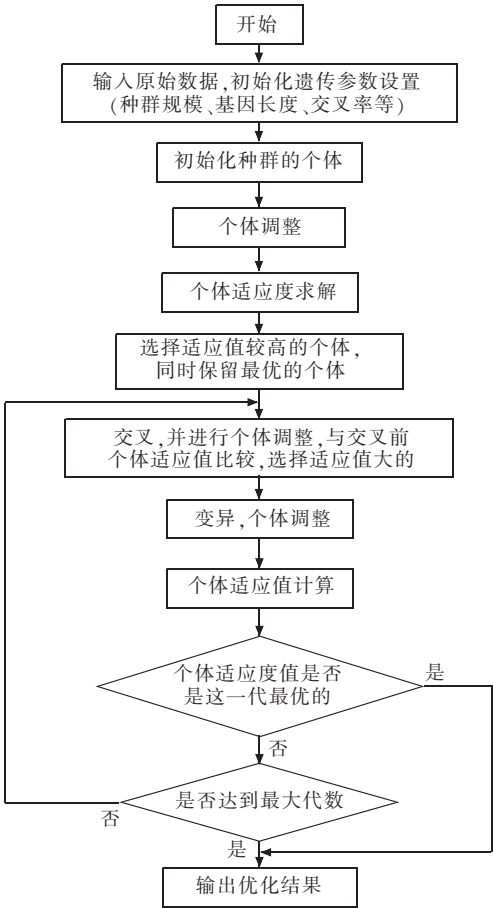


图 1 基于遗传算法的微电网电源规划流程图

市某社区“十二五”和“十三五”期间电力规划的微电网仿真系统,如图 2 所示。相关的负荷预测数据如表 1 所示。规划中微电源包括 300 kW 的微型燃气轮机、250 kW 的燃料电池、250 kW 的风力发电机和 200 kW 的光伏电池阵列,相关数据见表 2 和表 3。

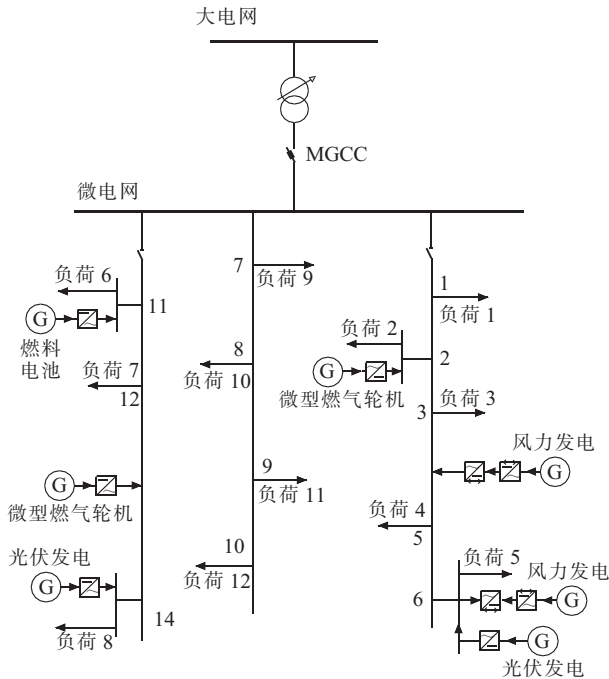


图 2 某微电网规划图

表 1 规划水平年内负荷最大量和用电量预测

规划年	2011	2012	2013	2014	2015
负荷 /kW	1 330	1 480	1 640	1 800	1 950
电量 /GW·h	6.2	7.1	8.0	8.9	9.3
规划年	2016	2017	2018	2019	2020
负荷 /kW	2 100	2 260	2 400	2 630	2 830
电量 /GW·h	10.2	11.0	11.7	12.5	13.2

表 2 微电网中微电源的相关数据 kW

微电源种类	MT	FC	WT	PV
单台功率上限	300	250	250	200
单台功率下限	0	0	5	3
投产约束	1 200	1 000	1 000	800

表 3 微电网中微电源的相关数据

微电源	投资费用 / (元·kW <sup>-1</sup> )	维护费用 / [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	年利用小 时数/h	燃料成本 / [元·(m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]
MT	5 000	0.004	6 400	1.8
FC	8 000	0.25	5 800	1.8
WT	10 000	0.18	2 800	0
PV	20 000	0.20	2 600	0

风力发电和光伏发电的技术成熟年分别为 2013 年和 2015 年,排放目标为 2020 年在 2010 年的基础上减少 5%,切负荷的价格 0.8 元/(kW·h),碳交易价格取 80 元/t,购电价格取 0.9 元/(kW·h),售电价格取 0.4 元/(kW·h)。遗传算法的参数取为:种群规模 100,运行代数 1 000 代,交叉率 0.75,变异率 0.05。

根据建立的模型和提出的算法,求得低碳经济下微电网电源规划结果如表 4 所示。

由表 4 可见,规划阶段前期,MT 和 FC 的装机容量比较大,到 2016 年达到峰值,装机容量分别为 1 108.75 kW 和 846.28 kW,之后,装机容量开始减少,到规划末年,装机容量变为 785.92 kW 和 474.28 kW。这主要是由于规划阶段前期,由于 WT 和 PV 受技术成熟年的制约,分别到 2013 年和 2015 年才开始投入运行,同时,MT 和 FC 的投资费用低,使其得到快速发展。而到了规划阶段后期,由于引入了强制减排目标,因此减少了 MT 和 FC 装机容量。由此可知,减排目标的引入,有利于快速实现电力企业低碳化。

同样由表 4 可见,WT 和 PV 分别到 2013 年和 2015 年才开始投入运行,在这之后,其装机容量开始逐年增加,并且增长速度超过同期 MT 和 FC 的装机容量,在规划末年,装机容量达到 875.76 kW 和 755.55 kW。考虑到 CO<sub>2</sub> 交易机制的引入,增加 WT 和 PV 的装机容量,可以获得更多的减排量用于出售,以获得收益,降低电力企业的投资成本。因此,在

表 4 低碳经济下微电网电源规划的优化结果

规划年	MT/kW	FC/kW	WT/kW	PV/kW	规划年购电量 /GW·h	规划年售电量 /GW·h	切负荷总量 /kW
2011	823.77	514.52	0	0	2.314 2	0.026 4	185.12
2012	947.45	562.05	0	0	2.076 3	0.083 7	166.08
2013	977.78	646.81	38.63	0	1.824 2	0.171 0	145.92
2014	1 022.35	730.42	73.15	0	1.385 7	0.306 2	110.80
2015	1 033.67	790.02	115. 93	43.25	1.032 4	0.868 4	82.56
2016	1 108.75	846.28	152.02	54.83	0.736 1	1.015 2	58.88
2017	1 010.63	822.81	363.31	192.86	0.425 7	1.368 7	34.16
2018	912.80	672.28	591.04	347.35	0.152 7	1.753 8	12.16
2019	838.03	563.02	694.03	584.02	0.082 6	2.030 5	6.48
2020	785.92	474.28	875.76	755.55	0.042 9	2.245 9	2.49

WT 和 PV 技术成熟以后，其相应的装机容量不断增加，获得了较快的发展。

根据选择的微电源型号，可确定最终的规划方案为：3×300 kW 的 MT，2×250 kW 的 FC，4×250 kW 的 WT 和 4×200 kW 的 PV。由此计算出规划年内 CO<sub>2</sub> 逐年排放量，如图 3 所示。

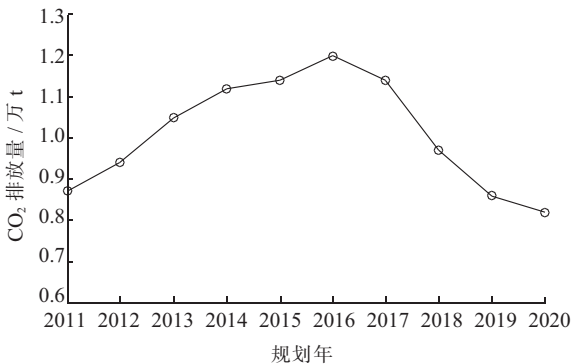


图 3 规划期内 CO<sub>2</sub> 逐年排放量

由图 3 可见，规划起始年的 CO<sub>2</sub> 排放量为 0.87 万 t，到 2017 年排放量达到峰值，为 1.20 万 t，随后排放量开始下降。经计算，在总的规划期内，CO<sub>2</sub> 总的排放量为 10.11 万 t，年平均排放量为 1.011 万 t，比规划期初年高出 18.94%，而规划末年的排放量为 0.82 万 t，比规划初年降低了 5.74%，达到了政府规定的排放要求。这是因为后期随着风力发电和光伏发电机组的不断投入，部分 MT 和 FC 机组退出运行，CO<sub>2</sub> 排放量逐渐下降的原因。

4 结束语

本文在微电网电源规划中计入低碳约束，引入 CO<sub>2</sub> 交易机制，以电力企业总效益最大为目标，建立了优化数学模型。通过改进的矩阵实数编码遗传算法求解，仿真结果表明，通过大力发展低碳电力技术，降低高排放高耗能的微电源装机容量的比例，可以很好地完成减排目标，降低电力行业的碳排放量，实现电力工业的低碳化。

参考文献：

[1] 魏一鸣,刘兰翠,范 英,等.中国能源报告(2008):碳排放研究[M].北京:科学出版社,2008.

[2] 张坤民,潘家华,崔大鹏.低碳经济论[M].北京:中国环境科学出版社,2008.

[3] 康重庆,陈启鑫,夏 清.低碳电力技术的研究展望[J].电网技术,2009,33(2):1-6.

[4] IVANA K. European Union Perspective on the Kyoto Protocol: Emissions Trading Scheme and Renewable Resources [C]. IEEE PES General Meeting, 2006.

[5] DOHTREY R, OUTHRED H, O'MALLEY M. Generation Portfolio Analysis for a Carbon Constrained and Uncertain Future [C]. International Conference on Future Power Systems, 2005.

[6] DECAROLIS J F, KEITH D W. The Economics of Large-scale Wind Power in a Carbon Constrained World [J]. Energy Policy, 2006(34):395-410.

[7] DENHOLM P, KULCINSKI G. Net Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions from Renewable Energy Storage Systems [R]. Report no. 223-1, Madison; Energy Center of Wisconsin, Available from <http://www.ecw.org/prod/223-1.pdf>.

[8] 陈启鑫,康重庆,夏 清,等.电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J].电力系统自动化,2009,33(15):18-23.

[9] DAMIEN C, TOSHKO Z. Emissions Targeting and Planning: An Application of CO<sub>2</sub> Emissions Pinch Analysis (CEPA) to the Irish Electricity Generation Sector [J]. Energy, 2008(5): 1-10.

[10] 王 灿,傅 平,陈吉宁.清洁发展机制对温室气体减排的贡献[J].清华大学学报(自然科学版),2008,48(3):357-361.

[11] 孙力勇,张 焰,蒋传文.基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J].中国电机工程学报,2006,26(2): 82-87.

[12] DAVIS G. Integration of Distributed Energy Resources [R]. 150-99-003, California; CERTS Program Office Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.

[13] KARINIOTAKIS G N, SOULTANIS N L, TSOUCHNIKS A I. Dynamic Modeling of Microgrids [J]. Future Power Systems, 2005, 18(18):1-7.

[14] KATIRAEI F, IRAVAI M R, LEHN P W. Micro-Grid Auton-

(下转第 8 页)



作者简介:

曹炳元(1963-),男,江苏武进人,高级工程师,从事发电技术管

理工作;

陈国年(1965-),男,浙江宁波人,高级工程师,从事电力技术管  
理工作。

### The Ratio of Heat-supply Indices for Large Scale Non-cogeneration Units and its Simple Calculation Method

CAO Bing-yuan<sup>1</sup>, CHEN Guo-nian<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Zhenjiang Power Generation Co. Ltd., Zhenjiang 212114, China;

2. Jiangsu Electrical Power Co. Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** According to the basic principle of Heat Quantity Method, a thorough research on the ratio of heat-supply indices and the statistical calculation method for the complicated heating system of large scale power generation unit were conducted in this dissertation. Having put forward the boiler heat output-based heat-supply definition formulas, a simple calculation method was then obtained for the daily statistics of power plants. This paper also discussed the applicable conditions of the ratio of heat-supply definition formulas under the industry standard, and statistical specification on unit heating load, which had positive guidance meaning for the occupation standard of heat-supply indices.

**Key words:** large scale power generation unit; non-cogeneration; heat-supply indices; ratio of heat-supply; statistical specification

(上接第 4 页)

omous Operation During and Subsequent to Islanding Proce-  
ss[J].IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(1): 248-257.

作者简介:

邹国春(1977-),男,江苏常熟人,工程师,从事励磁控制、调速、

变频器等方面的研究工作;

陈 棋(1979-),男,江苏张家港人,工程师,研究方向为励磁控  
制、变频器研制和电力电子应用;

石 磊(1978-),男,江苏海安人,工程师,研究方向为励磁控  
制、变频器研制和电力电子应用。

### Generation Expansion Planning for Microgrid with Low-carbon Economy Constraints

ZOU Guo-chun, CHEN Qi, SHI Lei

(NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210061, China)

**Abstract:** Based on the traditional power planning, this paper proposed a micro-grid generation expansion planning model under the conditions of low-carbon economy, taking the Clean Development Mechanism (CDM) and also carbon constraints and carbon trading into account. An improved matrix real-coded genetic algorithm was adopted to solve the model, and by enhancing the operator of genetic algorithm, the global optimal solution was obtained reliably and the convergence speed was improved. Results show that the proposed model and algorithm are reasonable and effective.

**Key words:** microgrid; generation expansion planning; low-carbon economy; carbon trading; matrix real-coded genetic algorithm

## 推广应用单避雷线

电网中的输电线路目前普遍采用的是两根避雷线配置的方案,线路工程造价相对较高,为了呼应资源节约型社会建设要求,大力节约投资成本,江苏省电力公司积极开展了将两根避雷线改进为单根避雷线的论证和验证工作。单避雷线方案可简化铁塔结构、减小塔重,减少钢材、混凝土等资源的消耗,降低工程造价,提高输电线路建设的效益和效率。

江苏省电力公司在成功试点应用的基础上,决定在 110 kV 电压等级全面推广单避雷线方案,并组织编制了《110 kV 单避雷线输电线路设计技术暂行规定》,对铁塔设计、导地线选择、绝缘配置、接地装置等进行了规定。同时按"标准化建设"的要求,公司开展了 110 kV 单避雷线通用设计方案的研究,共制定 24 种塔型的 110 kV 单避雷线通用设计方案,满足了全省范围内的工程建设的需求,大大提高设计和建设效率。

根据工程建设的实际情况测算:应用单避雷线方案,并对铁塔进行更深入的结构优化设计,可减少线路本体造价 6%~8%。