

# 基于风光互补的直流电网规划模型研究

王康 戴明明 李强 邓亚伟 王奎红 李志永  
(国网安徽省电力有限公司亳州供电公司 安徽 亳州 236800)

**摘要:** 社会工业化发展造成了能源短缺问题,目前,新能源的开发及利用已经成为能源战略的重要组成部分和发展方向。提出基于风光互补的直流电网规划模型,明确风光互补的直流电网规划指标,建立基于风光互补的直流电网规划模型;根据直流电网的二次规划,寻优风光发电收益指标,并给出电芯过热问题的实际解决方案。通过实验证明,与传统方法相比,基于风光互补的直流电网规划更合理。

**关键词:** 风光互补;直流电网;规划模型

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)04-0066-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.015

## Research on DC Power Grid Planning Model Based on Wind and Solar Complementation

Wang Kang, Dai Mingming, Li Qiang, Deng Yawei, Wang Kuihong, Li Zhiyong  
(State Grid Bozhou Electric Power Supply Company, Bozhou 236800, Anhui, China)

**Abstract:** The development of social industrialization causes the problems of energy shortage. At present, the development and utilization of new energy has become an important component and the development direction of energy strategies. A DC power grid planning model based on wind and solar complementation is proposed. The DC power grid planning indicators with wind and solar complementation are defined, and a model based on the wind and solar hybrid grid planning is established. According to the secondary planning of DC power grid, the income index of wind and solar power generation is optimized, and the practical solution for the overheating problem of the cell is given. Experiment results show that compared with the traditional method, the DC power grid planning based on wind and solar complementation is more reasonable.

**Key words:** wind and solar complementation; DC power grid; planning model

## 0 引言

在没有电网的偏远地域,如果想要使用大量的风电或光电,则需要提前储存能量,但风电和光电只有在在大风和光照正常的天气下才能实现能源源源不断地输送。所以在风能和光能相互补充的情况下,将太阳能电池、风力发电机以及蓄电池进行高效整合利用,可以使产生的电流不间断、电压稳定。将风光互补技术应用在太阳能以及风力发电系统中,实现风能以及太阳能转变为电能;然后,将其注入蓄电池中进行电能的保存,提供照明等设备所需的电能。这种技术可以保证一年四季均衡供电,使自然资源被充分利用。因此,提出基于风光互补的直流电网规划模型,即在直流电网规划过程中引入风光互补

发电系统,优化传统方法的电网规划有效性差的问题。

## 1 基于风光互补的直流电网规划模型

基于风光互补的直流电网规划模型相较于传统配电网采用交流配电模型,优势在于可以运用变压器的电磁感应效应改变电压,即将传统配电网的交流母线用直流母线替代,配电网拓扑结构也相应改变,直接采用直流方式实现供电<sup>[1]</sup>。

### 1.1 风光互补发电系统

风光互补发电系统是一个有机的电力能源系统。系统中的电力能源来源由两部分构成:风力能源和光伏电能。系统的工作流程包含对电能的收集、存储及再分配输出<sup>[2]</sup>。与普通发电系统有别的

是,该系统还具备通信互联模块、风力与光电的互补与连接站点互联环节。这一互联环节由许多的模块拼合:光伏电池、风力发电机组、整流器、控制器、储能设备、逆变器、负载<sup>[3]</sup>。在这个模块中,收集电能的这部分工作依靠风力发电机组与光伏电池完成“风力—电能”“光能—电能”的转化工作,这部分的运行亦是系统的核心功能。存储电能这部分工作则依靠蓄电池组运作,蓄电功能为保险功能,出现灾害气候等导致无法收集系统两大能源来源时,蓄电池能够保障电能的正常使用。此外,有蓄电这一额外的电力储备,也可以稳定电压,促进供电平衡。分配输出电能模块将会计算合适的发电功率,其中输出的电流负载由直流与交流两种负载构成,直流负载是本次的研究重点。系统中未列举的组件也有着其独特的转换、控制等功能,亦起着不可忽视的作用,系统的整体结构如图1所示。

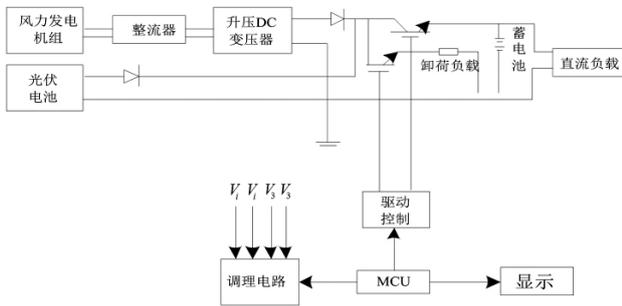


图1 风光互补发电系统

图中:  $V_i$  为风电机组和光伏阵列的总输出电压;  $I_i$  为风力发电机和光伏阵列的总输出电流;  $V_b$  为蓄电池电压;  $I_b$  为蓄电池电流。

### 1.2 规划指标

为整合电网、风光能源经济效益,必须对直流电网规划中的重要指标进行精确计算。风电场与普通常用发电机组不同,风力发电机组的输出功率会随着风力变化而发生变化。主要分为以下两种情况:

#### 1) 风电场的出力模型

风机在确定目标函数的情况下,可以捕获风能。则其风机目标函数为

$$\begin{aligned} \max E(G) = & \left[ \sum_{i=1}^4 W_1 E_{\text{grid}}(G), W_2 E_{\text{loss}}(G), \right. \\ & \left. W_3 E_{\text{wind}}(G), W_4 E_{\text{solae}}(G) \right] \quad (1) \\ \text{s. t. } & X \in \Omega \\ & H(X) = 0 \end{aligned}$$

式中:  $W_1 E_{\text{grid}}$  为风力发电耗时;  $W_2 E_{\text{loss}}$  为风力发电能耗;  $W_3 E_{\text{wind}}$  为风速概率分布函数;  $W_4 E_{\text{solae}}$  为风力发电调节函数;  $\Omega$  为尺度参数。则风机叶片的扫风面积影响风轮从风中吸收的功率,可以由式(2)表示:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v^3 \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风机叶轮的半径;  $C_p$  为风机的风能利用系数;  $v$  为风速。

由于风机出力值受到风速的影响,对此,将风机的输出功率视为其额定功率,其他情况风机的输出功率为0,即整体的风电机组出力模型为

$$P = \begin{cases} 0 & C_{co} < V < V_b \\ av + b & V_b < v < V_i \\ P_r & V_i < v < C_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $a, b$  为出厂时的风机功率曲线拟合参数;  $P_r$  为风机额定功率;  $V_i$  为风电机组和光伏阵列的总输出电压;  $V_b$  为蓄电池电压;  $C_{co}$  为并网节点电压。

#### 2) 光伏电站的出力模型

光伏发电机组在一定温度和辐射强度下,电池只能在某一特定电压时,输出功率才会达到最大值。假设在标准测试环境下,太阳能电池的负载电流为

$$I_{\text{STC}} = I_{\text{SC}} \left[ 1 - C_p \left( e^{\frac{U_{\text{STC}}}{e C_p U_{\text{OC}}}} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中:  $I_{\text{SC}}$  为短路电流;  $U_{\text{OC}}$  为线路电压;  $e$  为线路容量;  $U_{\text{STC}}$  为太阳能电池组的电压。

因为太阳能电池电压发生变化和温度、光照变化之间关联性较大,若要尽量多的运用太阳能资源,需要使用追踪最大功率方法,确定最大输出功率。那么在最大功率跟踪方法下,光伏电站出力模型表示为

$$P_v = \eta \times I_m(G, T) \times U_m(G, T) \times I_{\text{STC}} \quad (5)$$

式中:  $\eta$  为最大功率追踪装置的效率;  $I_m(G, T)$  为最大功率下的负载电流;  $U_m(G, T)$  为最大功率下的负载电压。

### 1.3 构建规划模型

在明确规划指标的基础上,建立直流电网规划模型。直流电网规划系统有功、无功满足等式约束为:

$$P_{\text{GI}} - P_V - U_{\text{STC}} \sum_{j=1}^N (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

$$Q_{\text{GI}} - U_{\text{STC}} \sum_{j=1}^N (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

式中:  $P_{GI}$  为发电机有功功率;  $\theta_{ij}$  为节点  $G$  与节点  $I$  的相角差;  $U_{STC}$  为节点导纳矩阵的实部元素;  $Q_{GI}$  为发电机无功功率;  $G_{ij}$  为节点导纳矩阵的虚部元素;  $B_{ij}$  为节点导纳矩阵的实部元素。

基于风光互补的直流电网规划模型为

$$F(X) = \sum_{i=1} P_i \frac{P_{GI}}{Q_{GI}} (P_{GI} + P_v) \quad (8)$$

式中:  $P_i$  为线路负荷阈值;  $P_{GI}$  为发电机有功功率;  $Q_{GI}$  为发电机无功功率。基于风光互补的直流电网规划模型,在风光互补发电系统的基础上,还包括能源路由器单元、信息收集单元、能量信息转换单元、直流母线单元、AC/DC 模块单元、直流负荷单元、风力发电装置单元。规划方法包括:

1) 能源路由器单元:由直流电网和信息收集单元组成,其中信息收集单元包含3个信息收集装置。

2) 直流母线单元:该单元最重要的模块是 AC/DC 模块,直流母线单元由直流电网、3个 AC/DC 模块和直流负荷装置组成。其中3个 AC/DC 模块构成了 AC/DC 单元,3个 AC/DC 模块分别与光伏发电装置、储能装置单元、风力发电装置单元连接<sup>[4]</sup>,如图2所示。

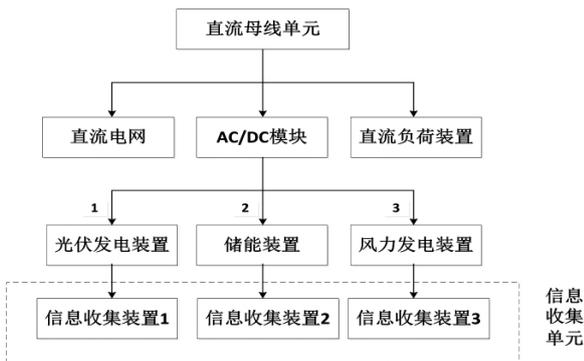


图2 直流电网规划模型规划

#### 1.4 二次规划寻优

为体现基于风光互补的直流电网规划模型是直流电网规划的最优解,对规划结果进行二次寻优。构建主动电网光伏发电投资收益为

$$E(G) = \left\{ \frac{1}{4} \times \left[ \sum_{i=1}^4 W_i E_{grid}(G) + W_2 E_{loss}(G) + W_3 E_{wind}(G) + W_4 E_{solae}(G) + 100 \times \frac{E_{solae}(G) - E_{wind}(G)}{E_{solae}(G)} \right] \right\} \quad (9)$$

式中:  $E(G)$  为主动电网光伏发电投资收益值;  $E_{solae}(G)$  为网损降低函数;  $E_{wind}(G)$  为光伏售电收

入函数。

除投资收益外,在直流输电过程中,还会伴随可靠性、安全性等问题。因此,考虑到目前直流配电存在的问题,需要利用现行约束条件解决问题。在基于风光互补的直流电网规划模型基础上,可对整个系统的热设计和热管理提出优化措施。电网系统的各个设备首尾依次相连,即为串联连接方式。基于此,可在电路串联前面安装一个风扇,风扇的作用是进行导流,形成风道调节电芯温度。利用流动风能降温原理,保证电芯与外部温差不超过  $3^{\circ}\text{C}$ 、集装箱内部温差在  $5^{\circ}\text{C}$  以内,且要保证几千只电芯之间的温度温差不超过  $5^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 实验验证

### 2.1 实验环境

为验证所设计的基于风光互补的直流电网规划模型的有效性,进行仿真实验分析。实验在 Matlab 平台上进行,操作系统为 Windows 10,系统运行内存为 8 GB,数据采样频率为 70 Hz,采样间隔为 0.2 s,实验样本节点为 30 个,风力发电机组的输出功率为 6 MW。具体实验环境如图3所示。



图3 实验环境

以上述实验环境为基础,以 IEEE 57 节点系统为实验算例,运用传统方法与所提方法分别进行仿真实验。算例节点系统包含 57 个节点和 50 个负荷消耗设备、7 台发电机,基准功率为 100 MVA。由于节点数量较多,截取其中 30 个节点进行实验。设定最大迭代次数为 150,采用容量为  $\pm 50$  Mvar 的净值无功补偿装置,进行无功补偿,使节点间耦合强度保持在 17。基于上述实验参数环境及算例参数设置,进行如下对比实验。

### 2.2 实验方案

实验将所建模型与传统的直流电网规划方法进行对比,以每 5 个节点为一测试段,进行实验。记录

实验对比数据,并利用 Matlab 软件输出实验结果。

### 2.3 实验结果分析与结论

实验对比结果如图 4 所示。

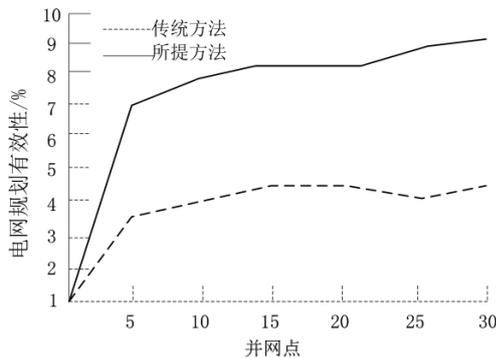


图 4 直流电网规划有效性对比

从图 4 可知,应用所设计的规划模型对直流电网进行规划,其规划有效性远高于传统方法,通过测电压偏差的实验证明在节点 6 并网可实现规划目标最优。以此证明基于风光互补的直流电网相对于传统的直流电网而言,更适用于直流电网规划,可以加快直流电网配套的新能源建设进程。

### 3 结 语

与采用单一发电技术的项目相比,风光互补项目可带来很多优势。在风电场增设光伏发电可以有效分摊并网及其他费用,提高项目净现值,同时在不增加弃电量情况下,使输出更稳定。此次研究不仅

从理论上证明了设计的有效性,也通过实验证明了设计的可行性。虽取得一定成果,但仍有不足之处,未来将对直流电网规划做补充性研究。

#### 参考文献

[1] 崔勇,杨菊芳,张栋. 基于风光互补的主动电网规划模型[J]. 中国电力,2017,50(5):101-106.

[2] 文阳,周步祥,王慧,等. 基于大规模风光互补的发电侧可调节鲁棒优化调度策略[J]. 电测与仪表,2017,54(5):9-15.

[3] 李晖,高涵宇,张艳,等. 考虑相关性的大规模风光互补电网扩展规划[J]. 电网技术,2018,42(7):2120-2126.

[4] 周辉,张新松,郭晓丽,等. 基于 Copula 理论的风电出力相关性建模及在输电网规划中的应用[J]. 科学技术与工程,2018,18(4):273-278.

#### 作者简介:

王康(1980),本科,高级工程师,主要从事电网规划研究;

戴明明(1982),本科,高级工程师,主要从事电网规划研究;

李强(1992),硕士,工程师,主要从事电网规划研究;

邓亚伟(1981),硕士,高级工程师,主要从事一次设备检修研究;

王奎红(1974),本科,高级工程师,主要从事统计与线损研究;

李志永(1984),本科,高级工程师,主要从事继电保护研究。

(收稿日期:2020-03-01)

(上接第 65 页)

[5] Joseph E B. Foundation Analysis and Design( fifth edition) [M]. McGraw - Hill Publishing ,1996.

[6] Kussakabe O. Bearing Capacity Analysis of Foundations on Slope by Use of Log - spiral Sliding Surface [J]. Soil and Foundations ,1990,30(3):678-680.

[7] 顾慰慈. 倾斜荷载作用下的层状地基的极限承载力[J]. 岩土工程学报,1984,6(1):38-51.

[8] 徐守国. 斜坡上地基承载力的研究[D]. 西安:西安公路学院:1992.

[9] 王年香,魏汝龙. 半无限土坡弹塑性应力的计算[J]. 水利水运工程学报,1999(1):1-11.

[10] 建筑地基基础设计规范:GB 5007—2011[S] 2012.

[11] 建筑地基基础设计规范:DBJ 50-047-2016[S] 2016.

[12] 建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2002[S] 2002.

[13] 港口工程桩基规范:JTS 167-4-2012[S] 2012.

[14] 公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S] 2019.

[15] 铁路桥涵地基和基础设计规范:TB 10093—2017[S] 2017.

[16] 水电水利工程边坡设计规范:DL/T 5353—2006[S] 2007.

[17] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[18] 建筑基坑支护规程:JGJ 120—2012[S] 2012.

#### 作者简介:

陈俊帆(1991),工学硕士,工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;

蒋锐(1984),工学硕士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;

黄兴(1974),工学学士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计。

(收稿日期:2020-02-18)