

[能源系统]

新能源大基地风光储容量协调优化配置

文/郭昌珍
济南睿能电力设计咨询有限公司

提出一种基于模型与算法设计的方法。通过综合考虑风能和光能发电技术的特点与优势，以及储能技术与系统的类型与应用场景，建立风光储容量优化模型，并设计相应的协调优化算法。结果表明所提出的方法能够有效优化容量配置，提高能源利用效率，降低能源系统的运行成本。

随着全球能源需求的不断增长和环境问题的不断加剧，可再生能源作为一种可持续发展的解决方案，受到广泛的关注和应用。新能源大基地作为一种集中式的能源供应模式，整合风能、光能和储能等多种能源形式，具有巨大的潜力。然而，新能源大基地的风光储容量协调优化配置问题是一个复杂的挑战，涉及风光资源的不确定性、储能技术的选择以及系统运行的经济性和可靠性等多个方面。本文旨在研究新能源大基地风光储容量协调优化配置问题，并提出一种综合的模型与算法设计，以实现最佳的能源配置方案。通过对风能和光能发电技术的特点与限制进行综述，探讨储能技术与系统的类型与应用场景。在此基础上，提出风光储容量协调优化配置的数学模型，并设计相应的协调优化算法。最后，进行实验与结果分析，评估所提出方法在实际应用中的效果与性能。

新能源大基地风光储容量协调优化配置的背景与问题

全球对能源的需求越来越大，可再生能源资源潜力大，对环境影响小，是解决能源供应安全、减缓气候变化等问题的主要选择。随着科技的发展，可再生能源成本逐步下降，效率越来越高。与此同

时，能源储存的发展为可再生能源大范围的使用提供支撑。新能源大基地对风光储能提出了更高的要求，这是能源转型中不可忽视的问题。新能源基地一般需配置储能设施，以应对新能源出力随机、间断性等问题。由于风能、太阳能等可再生能源发电波动性大，储能设施能够储存多余电力并在必要时予以释放，从而保证电力系统经济、可靠运行。另外，近年来我国也在积极筹划建设大型新能源外送基地——西北地区风光资源经直流输电线路向东部地区外送。这类新能源外送有其自身特点与要求。因输电距离长、输电损耗大等特点，有必要开展容量配置方面的研究工作，保证输电线路运行可靠、经济。鉴于新能源具有波动性、间断性等特点，还需对容量进行合理分配才能满足东部地区用电。但现有容量分配方法多以本地电网中新能源消纳为目标，对规模化新能源外送基地容量分配研究不足。因此有必要针对容量配置面临的挑战，提出一种适合大型新能源外送基地容量配置的方法。

风光储联合开发计划是确保可再生能源电力系统在高比例情况下安全、高效运行所面临的一个重要课题。合理风光配比能够充分发挥风电与光伏互补特性并降低新能源总体出力波动；储能的配置将

有利于进一步缓解新能源出力波动，实现稳定的能源外送，增强新能源消纳能力。但风电与光伏出力波动特性存在差异，风光配比不同时将造成储能需求不一，故风光储容量优化分配成为关键问题。求解这一问题需考虑风电、光伏与储能的内在联系，并通过构建适当的数学模型及优化算法寻求最优风光储比例方案，为了降低新能源总体出力波动，在兼顾经济性与可行性因素前提下提升系统稳定性与可靠性。解决风光储容量最优分配问题，对促进可再生能源大范围应用和能源转型至关重要。

风光储容量协调优化配置的现状

(1) 风能与光能发电技术的特点、优势与限制

风能和光能作为可再生能源的两大主要形式，在能源转型中发挥着重要的作用。风能发电技术利用风力驱动风力发电机转动，将机械能转化为电能；而光能发电技术则利用太阳辐射将光能转化为电能。它们各自具有特点、优势和限制。

风能发电技术可持续性强，技术成熟，灵活性强，是一种独具特色的发电技术。风能发电设备具有成熟度高、可靠性好、寿命长和运营成本低等优点。它们可随风速变化自适应调整，适应不同风速及负荷需求。另外风能发电设备施工及运行比较简单，对环境的影响小。光能发电技术则是利用了太阳辐射范围广、环保、模块化和可利用范围广等优点。光能发电设备一般采用光伏电池构成，利用光电效应把太阳光转换成电能。与传统化石燃料发电相比较，光能发电具有无排放，无噪声和环境友好等特点。另外，光能发电设备模块化特点明显，可以按需灵活拓展布置，适合多种尺度能源系统。但是风能与光能发电技术同样面临着一定的制约与挑战。风能发电受风速影响较大，风速过低或过大会影响发电效率。另外，风能发电设备建设需占用较多土地面积和风资源地理分布依赖性强。光能发电受到天气条件影响，云层覆盖及夜间等条件都会引起发电量波动。另外，光能发电设备在制造过程中涉及稀有材料及能源消耗等问题，其制造工艺可持续性有待进一步提升。

(2) 储能技术与系统的类型、特性与应用场景

储能技术对新能源大基地风光储容量分配具

有重要影响。储能系统能够均衡风能与光能波动，为能源提供稳定供给，提高能源利用效率。储能技术按种类及特点可划分为许多不同体系。

1) 电化学储能系统是最常见和成熟的储能技术之一。其中锂离子电池作为应用最广泛的电化学储能技术，其能量密度高、寿命长、自放电率低。它们适合家庭储能系统、分布式能源系统等中小型储能系统。另外，液流电池技术得到了广泛的研究与应用，其高效率、可扩展性以及长寿命等优点适合大规模储能系统以及电网调度等领域。

2) 机械储能技术作为储能形式，具有可靠性高、效率高等特点。压缩空气储能，液流储能等机械储能系统具有代表性。压缩空气储能系统是通过压缩和存储空气，并在必要的时候再释放出来带动涡轮机产生电能。液流储能系统是利用液体动能储能并释放液体。这些技术寿命长、效率高、对环境影响小，适合大规模储能及电网调度。

3) 热能储能技术在风光储能领域同样占有举足轻重的地位。热储能系统是将电能或者热能转换成热能进行存储，并在必要的时候再释放出来带动蒸汽涡轮机或者热能发电机组发电的系统。熔盐储能、岩石储能等热能储存技术较为普遍，其效率高、寿命长、对环境的影响小。这类技术适合大规模储能，集中供应可再生能源。

总之，不同种类储能技术有不同的特点及应用场景。电化学储能适合小、中规模储能系统使用，机械储能适合大规模储能及电网调度使用，热能储能则适合大范围储能及可再生能源集中供给使用。通过对储能技术的合理筛选与配置，可使风光储能系统高效、可靠、可持续地运行并促进新能源的开发与应用。

优化配置模型与算法设计

本新能源外送基地模型主要由风电、光伏、火电和储能等组成，如图1所示。直流通道容量及火电容量是已知的，风电、光伏及储能容量是需要规划的变量。为了保证可靠性，还可能与其他送端电网支援通道需要满足周期性电量平衡约束。在没有支援通道的情况下，将每个时间段的支援量设置为零，以免从其他电网要电。

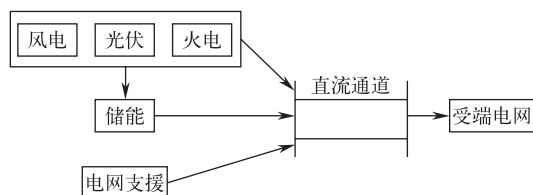


图1 能量传送流程

直流输电计划功率作为新能源外送基地模型的一个关键指标，对其进行合理规划对实现可靠高效能源外送具有重要意义。直流输电计划功率确定需综合考虑诸多因素，主要有新能源发电能力、储能设备能力和外送通道约束。新能源发电的能力是直流输电计划中最重要的功率源。风电、光伏发电产能受到天气条件、设备性能的影响较大，需结合实际情况做出精确预测与估计。以火电为已知量的产能可为稳定基准供应提供依据。储能设备容量对于直流输电计划功率有显著影响。储能设备能够将新能源发电大于需求后的多余电能储存起来，当需求大于发电后释放储能来均衡供需差异。所以，合理地规划储能容量能够增强系统灵活性与稳定性，保证直流输电计划功率可靠。另外还需考虑外送通道约束。直流通道容量受输电距离，电压等级和线路损耗的限制，所以有必要考虑上述因素以保证直流输电计划功率满足通道容量要求。各典型负荷场景下相应直流输电计划功率需要满足以下约束条件。

- 1) $\sum_{t=1}^T \leq 2$ 表示每日最大功率调整次数为2。
 - 2) $p_1^{\text{HVDC}} = p_T^{\text{HVDC}}$ 表示初始和结束功率相同。
- 此时，直流输电计划功率可表示为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (p_t^{\text{HVDC}} - p_{i,t}^D)^2 \\ \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (p_t^{\text{HVDC}} - p_{i,t}^D) \Delta t = 0 \end{cases}$$

选择负荷峰值为 8 000 MW；直流输电容量上限为 8 000 MW；火电机组出力上限为4 000 MW；火电机组出力下限为1 000 MW；火电向上爬坡功率上限为1 000 MW；火电向下爬坡功率上限为1 000 MW；新能源弃电率上限为10%；储能最低电量为20%。风电统计特征与时间关系如图2所示。

从实际工程的角度出发，该研究将风光配比固定不变，将送电置信概率定为0.95，用于风光储容量的规划。其结果见表1。由表1可知，相对于最优配置方案，光伏比例过高将显著提高对应储能配置

容量及总投资成本。但是，在风光配比近2:1的情况下，风电与光伏互补出力特性能够得到充分利用，资源配置得到优化。采用固定风光配比、考虑送电置信概率等方法，可以在实际项目中规划风光储容量，从而达到经济性与可靠性兼顾的目的。

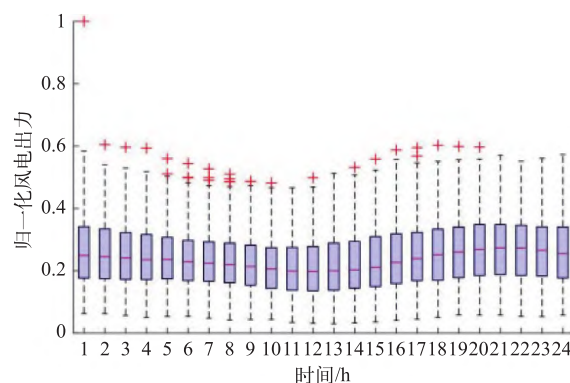


图2 风电统计特征与时间关系

表1 固定风光配比规划

风光配比	风电电容/ MW	光伏电容/ MW	储能功率/ (MW·h)	储能容量/ (MW·h)	成本/ 元
2 : 1	7.78	3.89	1.82	8.75	570.2
1 : 1	6.23	6.23	1.83	9.27	586.0
4 : 5	5.66	5.66	1.90	9.33	590.6

结束语

在最优容量分配方案下，风电容量大约是光伏的2~3倍。但是，通过引入分布鲁棒规划模型，发现光伏容量随恶劣场景考虑而逐渐增大，造成风光配比降低。这一研究结果说明了实际项目中可依据不同场景分布灵活调节风光配比来达到最佳容量配置方案。这一灵活性有助于充分利用风电与光伏互补出力特性来实现资源的优化配置以及能源利用效率的提升。

该研究中的容量配置方法对国内大型新能源基地建设具有一定的有益指导与借鉴。进一步的研究可以专注于开发高效的容量优化分配求解算法，考虑到不确定性的因素，以进一步提升规划效果和工程实用性。通过深入研究不确定性对容量配置的影响，并开发相应的求解算法，可以更好地应对新能源系统规划中的挑战，提高规划方案的可行性和鲁棒性。这将有助于推动可持续能源发展的进程，为我国大型新能源基地的建设提供更加有效的参考和指导，促进清洁能源转型的实现。EA

(收稿日期：2024-03-14)