

基于LCC的风电场群功率输出容量优化方法研究

风电出力的随机性和间歇性等特点,影响了电力系统的可靠性和经济性,因此研究风电功率外送输电容量优化方法,制定规划方案,提高风电输送能力,推进风电外送输电工程的建设以满足大规模风电的外送需求非常必要。首先研究了含风电场群的输电网规划模型方法,然后引入了全寿命周期成本理论,分析了风电场群功率外送输出容量的优化问题、含风电场群的输电网规划与经济性的评价和风电场与输电网规划相协调的规划模型方法。以全寿命周期成本最小为目标提出规划方案,促进含风电场群的输电网优化规划的合理布局。在考虑资金时间价值的基础上,通过对实例分析,验证了所提优化方法具有理论价值和现实意义。

丛 晶/云浮市供电局有限公司

风电出力具有低可控性等特点,限制了风电输送容量,使得输电网优化规划变得困难^[1]。因此,有必要加强输电网的建设来实现系统可靠送电的需求。输电网规划是复杂的、大规模的、含有大量约束条件和离散变量的一个多目标、非线性及具有动态性的整数规划问题。传统的具有确定性的规划未考虑风电的波动特性和整个系统规划中的全过程,因此无法全面准确地进行潮流计算和网损分析,影响规划的路径选择和决策结果。

现有的优化模型未考虑风电场模糊因素对电网规划造成的影响,或者是考虑了太多的因素从而加大了求解难度。本文引入全寿命周期成本(LCC)的概念,以全寿命周期成本最小为目标,以风电场群的累积出力曲线为基础,建立风电场群功率集中外送输电容量的优化

方法模型。

全寿命周期成本^[2]是指从设备或系统的长期经济效益出发,从设备和项目的全过程考虑,在满足可靠性的前提下以全寿命周期成本最小为目标的一种管理理念和方法^[3],包括一次投资成本、运行成本、维护成本、电量损失成本和废弃成本。

在充分考虑风电场功率波动特性对电网影响的基础上,构建了基于LCC含风电场群的输电网输出容量优化方法模型,考虑了资金的时间价值,对系统进行全寿命周期成本分析计算,以最优化值进行决策,分别介绍了投资、运行、维护、电量损失、弃风损失和报废成本模型在电网规划中的应用。

基于LCC的输电容量优化研究

分析风电场群功率波动特性^[4]具有“汇聚效应”的特点,引入LCC理念,满足风电送出需求、输电工程建设成本和输电运行收益等多方面的利益,进一步完善模型。基于LCC的风电场群功率输出容量的综合优化数学模型为

$$\max_{0 \leq P_{line} \leq P_n} f = \sum_{t=1}^n AIR_t(P_{line}) - \sum_{t=1}^n AIC_t(P_{line}) \quad (1)$$

计算公式展开为

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq P_{line} \leq P_n} f = & \sum_{t=1}^n AIR_t(P_{line}) - \left[\sum_{t=1}^n AIC_{I,t}(P_{line}) + \right. \\ & \sum_{t=1}^n AIC_{OM,t}(P_{line}) + \sum_{t=1}^n AIC_{L,t}(P_{line}) + \\ & \left. \sum_{t=1}^n AIC_{D,t}(P_{line}) \right] \quad (2) \end{aligned}$$



丛 晶/助理工程师

关键词/Keywords

风电场群·
输电网规划·
全寿命周期成本·
优化·

吉林省教育厅科技项目(吉教科合字[2012]第101号)。

式中, n 为规划年限; $AIR_t(P_{line})$ 为第 t 个时段所规划的输电工程全回收周期输送风电的总收益等年值; $AIC_{I,t}(P_{line})$ 为第 t 个时段输电工程建设投资等年值; $AIC_{OM,t}(P_{line})$ 为第 t 个时段输电工程运行维护等年值; $AIC_{F,t}(P_{line})$ 为第 t 个时段输电工程电量损失等年值; $AIC_{D,t}(P_{line})$ 为第 t 个时段输电工程残值。其中, 当 f 为最大值时, 目标函数的 P_{line} 即为使得综合收益最优的输电容量。

1. 输电工程全回收周期输送风电的总收益

所规划的输电工程全回收周期输送风电的总收益 $R(P_{line})$ 正比于风电场群发电量, 其计算公式为

$$\sum_{t=1}^n R_t(P_{line}) = \sum_{t=1}^n K_{r,t} G_{w,t} \quad (3)$$

$$G_{wind} = P_{line} T_{line} + \int_{T_{line}}^{T_{end}} P_d(t) dt \quad (4)$$

式中, K_r 为输电企业输送单位风电电量的收费, 元/(kW·h); G_{wind} 为输电工程每年送出的风力发电电量; T_{line} 为风电场群出力高于 P_{line} 的持续出力时间; T_{end} 为风电场群总的持续出力时间; P_{line} 与 T_{line} 的关系可由 $P_d(t)$ 以查表的方式求出。

2. 输电工程电网一次投资成本

输电工程电网一次投资成本 $C(P_{line})$ 的计算公式为

$$\sum_{t=1}^n C_{I,t}(P_{line}) = \sum_{t=1}^n K_c P_{line} L \quad (5)$$

式中, K_c 为单位容量、单位长度的输电工程造价; L 为输电距离。

(1) 电网运行维护模型

图1为浴盆曲线, 表示设备失效率主要随时间变化, 包括3个阶段^[5]。浴盆曲线考虑了设备从投运到报废整个周期内的可靠性问题。浴盆曲线以时间为横坐标, 失效率为纵坐标。由图1可知, 在

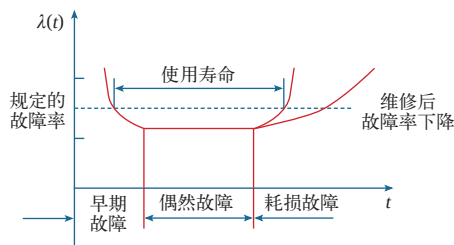


图1 浴盆曲线图

整个周期内, 虽然设备故障发生的机理不同, 但设备故障变化大致可以归纳为3个阶段, 即早期故障期、偶然故障期和耗损故障期。

1) 早期故障期。实际电网中, 设备使用初期故障率普遍偏高。但随着设备在电网中的运行, 故障率会下降。产生故障的主要原因是设计与制造过程中的缺陷。

2) 偶然故障期。当设备运行一段时间后, 产品的故障率会稳定在一个较低的水平, 在实际系统分析中可设其为常数, 故设 $\lambda(t) = \lambda$, 且可以通过可靠度计算公式求得 $R(t) = \exp[-\int \lambda(t) dt] = e^{-\lambda t}$ 。这一时期在设备运行的整个周期过程中占主导, 时间跨度最长, 发生的事故主要是由偶然因素导致。

3) 耗损故障期。每种设备都有其自身的寿命周期。当设备使用时间到达寿命周期时, 设备故障率会迅速上升。故障产生的原因主要是因为设备疲劳、老化、腐蚀和磨损等。通过对设备数据的分析, 可以近似确定设备使用年限。在设备使用期限内对其进行维修、更换, 可以降低电网的故障率, 延长设备的使用寿命。

其中, 运行维护成本主要是从设备和线路两方面考虑。根据浴盆曲线定义, 可把运行维护成本分为

$$C_O(P_{line}) + C_M(P_{line}) = \begin{cases} \sum y_1 K_c P_{line} L & 1 \leq n \leq 5 \\ \sum y_{\text{常}} K_c P_{line} L & 6 \leq n \leq 15 \\ \sum y_2 K_c P_{line} L & 16 \leq n \leq 20 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $y_1 = ax_1 + b$; $y_2 = ax_2 + b$; $y_{\text{常}}$ 为常数项; a 、 b 为已知常数。

运行维护成本为

$$C_{OM} = \sum_{i=1}^n \left[E_{Gi} C_{O\&M} + \int_0^{8760} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \frac{L_{ij}(P_{oij} + P'_{oij})C_{ij} + L'_{ij}(P_{ij} + P'_{ij})C'_{ij}}{L_{ij}(P_{ij} + P'_{ij})C'_{ij}} \right] C(t) \quad (7)$$

式中, E_{Gi} 为第 i 台发电机组的发电量; $C_{O\&M}$ 为单位发电量的运行维护费用; n 为网络节点总数; P_{oij} 、 P'_{oij} 为现有线路的输电功率, MW; P_{oij} 为 $i \rightarrow j$ 方向, P'_{oij} 为 $j \rightarrow i$ 方向; P_{ij} 、 P'_{ij} 为新建线路的输电功率, MW; P_{ij} 为 $i \rightarrow j$ 方向, P'_{ij} 为 $j \rightarrow i$ 方向; L_{ij} 、 L'_{ij} 为原

有及新建线路长度, km; C_{ij} 为原有线路的损耗系数; C'_{ij} 为新建线路的投资乘以效益系数再加损耗系数。一般系数 C_{ij} 与 C'_{ij} 可由回归分析估计, 近似计算取 $C_{ij}=1$, $C'_{ij}=5\sim 8$ 。

各节点功率平衡约束条件为

$$A_i = \sum_{j=1}^n (P_{oij} - P'_{oij} + P_{ij} - P'_{ij}) \quad i=1, 2, \dots, n_1 \quad (8)$$

$$D_k = \sum_{j=1}^n (-P_{okj} + P'_{okj} - P_{kj} + P'_{kj}) \quad k=1, 2, \dots, n_2 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} A_i = \sum_{k=1}^{n_2} D_k \quad (10)$$

式中, A_i 为电源点 i 的发电功率, 若该点发电功率与负荷自相平衡, 则 $A_i=0$; D_k 为负荷点 k 的负荷功率; n_1 为电源点数; n_2 为负荷点数。

线路通过能力的限制条件为

$$P_{oij} + P'_{oij} \leq P_{ij}^- \quad (11)$$

式中, P_{ij}^- 为线路 ij 的通过能力。

其他约束条件为

$$\begin{aligned} P_{oij}, P'_{oij}, P_{ij}, P'_{ij} &\geq 0 \\ P_{oij}, P'_{oij} &= 0, P_{ij}, P'_{ij} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

(2) 考虑弃风的效益损失优化模型

风电场实际运行中由于输电容量不足造成弃风损失是对风能资源的一种浪费, 因此在考虑输电工程综合效益时, 应考虑可能发生的输电阻塞造成的弃风效益损失, 以及成本效益的损失, 因而在整体考虑输电工程的综合效益中计及考虑因可能的输电阻塞造成的弃风效益损失^[6], 其模型为

$$L(P_{line}) = K_c G_1 T_s \quad (13)$$

式中, K_c 为弃风所导致效益损失的补偿单价(按照风电发电单价计算); G_1 为弃风导致的风电弃风损失电量, 其计算公式为

$$G_1 = \begin{cases} 0 & P_{line} \geq P_{dmax} \\ \int_0^{T_{line}} P_d(t) dt - P_{line} T_{line} & P_{line} < P_{dmax} \end{cases} \quad (14)$$

对于不同时段弃风损失是不相同的, 考虑多阶段的弃风效益损失模型为

$$L(P_{line}) = \sum_{t=1}^n AIC_L = \sum_{t=1}^n AIK_L G_{lost} \quad (15)$$

式中, AIC_L 为由输电阻塞造成的弃风损失成本等年值; AIK_L 为第 t 个时段弃风导致效益损失的补偿单价(按风电发电单价计算); G_{lost} 为第 t 个时段弃风导致的风电弃风损失电量。

(3) 电网用户电量损失模型

用户停电损失成本是运行中的经济性指标, 由停电损失 C_t 来衡量。 C_t 与系统的停电损失评价率(Interrupted Energy Assessment Rate, IEAR)和 M_{EENS} 有关, 是由于电网供电中断而引起的经济损失, 根据负荷点的停电损失评价率 α_i 和该点负荷在系统中的用电比例加权得到

$$\sum_{t=1}^n C_{F,t} = \sum_{t=1}^n \alpha M_{EENS} \quad (16)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \alpha_i \quad (17)$$

式中, n 为负荷节点数; α_i 为该点负荷占系统总负荷的比例。

本次以考虑系统的可靠性为主, 采用电量不足期望值(Expected Energy Not Served, EENS), 其计算公式为

$$M_{EENS} = \frac{8760}{T} \sum_{i \in S} P_i t_i \quad (18)$$

式中, S 为有切负荷的系统状态集合; P_i 为系统状态 i 的切负荷量; t_i 为系统状态 i 的持续时间; T 为仿真总时长。

(4) 电网残值费

设备残值费是指电力设备寿命周期结束后, 对设备或者系统进行清理、销毁所需支付的费用。根据产品类型以及用途的不同, 残值费也不尽相同。例如: 设备的正常报废, 这种报废可以产生一定数量的残值收入; 化学产品及核产品报废和清理, 这种报废需要再花费大量的资金。因此对设备残值评价通常根据当前市场情况, 认为设备残值发生在设备寿命周期初期, 属于现值。

假定设设备残值为 C_D , 其寿命为 n 年, 设贴现率为 i , 则根据资金时间价值, 设备残值转化为等年值为

$$\sum_{t=1}^n C_{D,t}(P_{line}) = \sum_{t=1}^n \left[\frac{C_t i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (19)$$

实际算例分析

如图2所示，在给定的风电功率输电容量的出力曲线前提下，确定风电集中外送最优的输电容量，可以算出弃风损失电量和发电量。提高输电容量有利于风电送出的保障性，还可以减少弃风损失，但输变电工程的成本却相应提高。而降低输电容量有利于输电工程成本的减少，但却忽略风电的送出，弃风电量损失更多。因此存在一个平衡点，即最优容量值。使得风电外送综合收益达到最大。

以某省风电场群功率集中外送输变电工程容量优化为例，设计3套方案。方案1运用指标计算出的最优容量进行计算；方案2采用给定的静态算出的最优容量进行计算；方案3按照总装机容量来计算。给定的计算条件如下表所示。

表 已知参数条件

输电企业输送单位风电电量的收费 K_c /[元/(kW·h)]	0.06
输电距离 L /km	200
输电工程单位综合造价 K_l /[万元/(MW·100 km)]	100
电网输电阻塞造成风电弃风损失的补偿单价 (按风电发电单价计算) K_f /[元/(kW·h)]	0.6
输电投资动态回收周期 n	20a
运行维护率，占投资的百分比例	大修率为1.4%， 基本折旧率为4.8%
功率因数 $\cos \varphi$	0.9
贴现率 i (%)	8
用户停电损失成本	占总投资的0.01%
残值	占总投资的1%

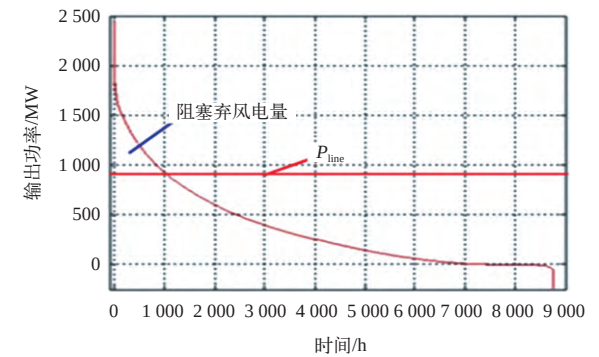


图2 基于实测的风电场群持续出力曲线的风电外送容量示意图

根据以上的已知条件和公式，应用Matlab进行编程，结果如图3、图4所示。

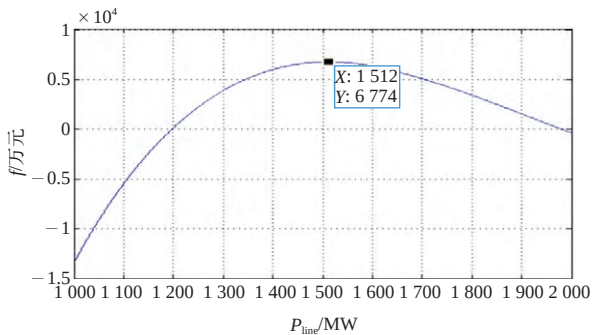


图3 风电外送最优输电容量的示意图（方案1等年值）

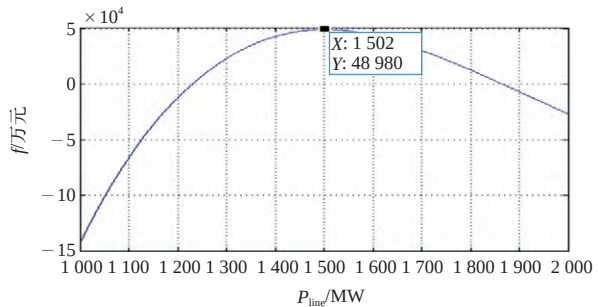


图4 风电外送最优输电容量的示意图（方案2静态综合收益）

通过计算得出，方案1的最优容量为1512 MW，综合收益为0.6亿元，该容量下的收益为3.79亿元，电网一次投资成本为2.8亿元，电网的运行维护成本为678.59万元，用户损失为3.02万元，弃风损失为0.2亿元，设备残值为301.7万元。

方案2的最优容量为1 502 MW，综合收益为0.43亿元，该容量下的收益为3.79亿元，电网一次投资成本为2.8亿元，电网的运行维护成本为428.97万元，用户损失为3.06万元，弃风损失为0.21亿元，设备残值为300万元。

方案3的最优容量为3 000 MW，综合收益为0.8亿元，该容量下的收益为3.79亿元，电网一次投资成本为2.8亿元，电网的运行维护成本为428.97万元，用户损失为3万元，弃风损失为0亿元，设备残值为301.7万元。

通过3种方案的对比可以看出，考虑电网的运行及资金的时间价值可以更好地实现风电可靠送出以及经济性最优，为风电基地外送输电容量的优化提供有力依据。

(下转第53页)

中严格把控,最终建成高性能、高收益和节能环保的优质电源项目^[8-9]。

参考文献

- [1] 余旭阳. 电力系统暂态稳定概率分析及控制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [2] 吴红斌. 含FACTS元件的电力系统概率暂态稳定评估[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [3] 程朝晖. 600 MW发电机组出口装设断路器问题的探讨[J]. 华中电力, 1999, 12(1): 18-20.
- [4] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术, 2005,

29(4): 12-13.

- [5] 王博. 复杂电力系统安全风险及脆弱性评估方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [6] 陈伟, 夏朋辉, 何邕, 等. 印尼小电网过激磁保护设置的分析及处理[J]. 电力学报, 2014, 29(1): 14-19.
- [7] 崔芳芳, 张薇, 王晓茹, 等. 电力系统自动切负荷控制仿真研究[J]. 电气应用, 2008, 27(9): 10-12.
- [8] 陈伟. 海外工程中燃料付款与热耗率及煤耗的关联研究[J]. 华电技术, 2013, 35(9): 69-70.

(收稿日期: 2014-07-14) EA

(上接第47页)

结束语

以风电场群实际出力曲线为依据,提出基于全寿命周期理论的风电场群输出容量优化方法,构建了基于LCC的风电送出的最优容量模型。结果表明,最优输出容量的确定取决于电网的运行方式、资金的时间价值和设备报废等参数。只有确定系统容量和模型以后,才可以通过仿真确定符合线性关系的扰动容量上限。根据算例结果表明了所建模型的可行性,能体现其综合效益的最优,为风电场群的投资决策提供更加灵活有力的支持。

参考文献

- [1] 程浩忠, 张焰. 电力网络规划的方法与应用[M].

上海: 上海科学技术出版社, 2002.

- [2] Antti Saaksvuori, Anselmi Immonen. Product life cycle management[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [3] Alain Bernard. Methods and tools for effective knowledge life-cycle management[D]. Berlin: Springer, 2008.
- [4] 王茜. 风电场与输电网协调规划的模型和方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [5] 宋宪福, 张玉丽. “浴盆”曲线理论在变电设备检修工作中的应用[C]. 山东电机工程学会第五届供电专业学术交流会论文集, 2008: 150-152.
- [6] 穆钢, 崔杨, 严干贵. 确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 15-19.

(收稿日期: 2015-01-10) EA