

考虑电缆故障时海上风电场 电气系统开关配置方案的经济性比较与分析

王建东¹, 李国杰²

(1. 甘肃省电力公司, 甘肃省 兰州市 730050; 2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室
(清华大学电机工程与应用电子技术系), 北京市 海淀区 100084)

Economic Study on Switchgear Configuration in Electrical Systems of Offshore Wind Farms With Cable Outage

WANG Jian-dong¹, LI Guo-jie²

(1. Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, Gansu Province, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments
(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Along with the rapid development of offshore wind farms, the internal electric system of them has caused wide public concern. In this paper the economy of switchgear configuration for offshore wind farms is researched and based on traditional switchgear configuration the switchgear complete configuration and the switchgear partial configuration are put forward respectively; after the comprehensive consideration of two factors, i.e., the cost of investment and the fault opportunity cost due to the fault of submarine cable, the total costs of above-mentioned three switchgear configuration are assessed, and the sensitivity analysis on such factors impacting total cost as the price of switchgear, cable failure rate and maintenance time of failure is performed. Analysis results show that considering the economy, the switchgear partial configuration is the best one in the three switchgear configurations.

KEY WORDS: offshore wind farms; internal electrical systems; switchgear configurations; economy

摘要: 随着海上风电的迅速发展, 海上风电场内部电气系统设计受到广泛关注。针对目前较常用的放射形布局, 从开关配置的角度对其经济性进行研究, 在传统开关配置方案基础上提出了开关完全配置方案和开关部分配置方案, 并在综合考虑了投资成本和由于海底电缆故障引起的故障机会成本2个因素后, 对上述3种开关配置方案的总成本进行评估, 对影响总成本的开关设备价格、电缆故障率和故障维修时间等进行了灵敏度分析。分析结果表明, 从经济性角度考虑, 开关部分配置方案是3种开关配置方案中的最优选择。

关键词: 海上风电场; 内部电气系统; 开关配置方案; 经济性

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977050, 50823001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50977050, 50823001)。

0 引言

随着全球风电的迅速发展, 丹麦和德国等国家的陆上风电开发已渐趋饱和, 而资源丰富的海上风能绝大部分还处于未开发状态。离岸10 km的海上风速通常比沿岸陆上风速高25%左右^[1], 且具有稳定的主导风向。海上风电不受土地限制, 视觉及噪音的影响小, 可大规模开发。因此, 许多沿海国家已将海上风电作为新的发展方向, 欧洲海上风电的开发已取得了令人瞩目的成果^[1-3]。

我国地域辽阔, 海岸线长, 风能资源十分丰富, 海上可开发和利用的风能储量有750 GW。随着上海东海大桥100 MW海上风电示范项目的开展, 海上风电在我国已拉开序幕^[4]。

目前, 海上风电场内部电气系统布局设计分为放射形、环形和星形3种形式^[5-7], 其中放射形布局因投资成本最低^[8]而成为正在运行的海上风电场中用得最多的内部电气系统布局^[5,9-10]。

放射形布局的海上风场内部电气系统通常采用变压器接口处每根中压电缆配置一个开关的设计, 这种配置方案开关数少, 投资成本低^[11]。然而, 一旦中压电缆发生故障引起开关跳闸, 该条电缆将没有风电功率输出, 这将带来很大的损失。

本文将在传统的放射形布局开关配置方案基础上提出开关完全配置方案和开关部分配置方案, 并通过比较上述3种开关设备配置方案的投资成本、故障机会成本以及开关设备成本、电缆故障率、

故障维修时间的变动,进一步分析3种开关配置方案的经济性。

1 基于放射形布局的开关配置方案

本文提出的基于放射形布局的开关配置方案见图1,图1对风机作了简化,没有画出每台风机的升压变、开关^[11]。图中: a 为同一行相邻风机的距离; b 为相邻行风机的行间距。

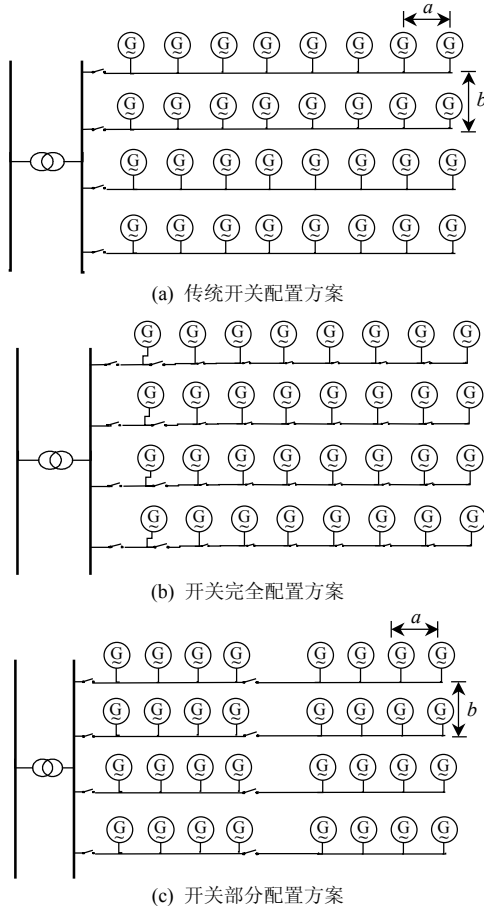


图1 基于放射形布局的开关配置方案

Fig. 1 Switchgear configurations based on radial layout

基于放射形布局的传统开关配置方案如图1(a)所示,该方案将一定数目的风力发电机连接在同一条中压海底电缆上,整个风电场的电能通过若干个中压海底电缆输送到中压汇流母线上。海底电缆的额定功率须大于所连接风机的最大功率。开关设备只安装在中压电缆接入中压汇流母线的入口处。该布局的优点是操作简单、投资成本较低;缺点是可靠性不高。如果中压电缆的某处发生故障,则整条中压电缆将被迫切除,与之相连的所有风机将停运。

本文提出的开关完全配置方案如图1(b)所示。该方案在传统开关配置方案的基础上,将风机连接的中压电缆两侧加装开关装置。在该方案中,如果

中压电缆的某处发生故障,则通过开关装置动作,可将故障点后的风机全部切除,而故障点前的风机仍能维持正常运行。

本文提出的开关部分配置方案如图1(c)所示。该方案在传统开关配置方案的基础上,在中间2台风机的内侧中压电缆上加装开关装置。在该方案中,如果中压电缆的开关装置之后发生故障,则通过开关装置动作,可全部切除开关装置之后的风机,而开关装置前的风机仍能维持正常运行;如果电缆的开关装置之前发生故障,整条电缆都将被迫切除,与之相连的所有风机将停运。

2 3种开关配置方案的投资成本评估

根据丹麦海上风电场的建设经验,海上风电场的建设成本为120~270万欧元/MW,海上风电场成本构成如图2所示^[1]。海底基建、中压海底电缆、海上变电站和输电通道是导致投资成本大大增加的主要原因。文献[8]对海上风电场内部电气系统不同布局设计进行了经济性对比,本文在成本较低的放射形布局设计的基础上,对3种不同的开关配置方案进行投资成本评估。

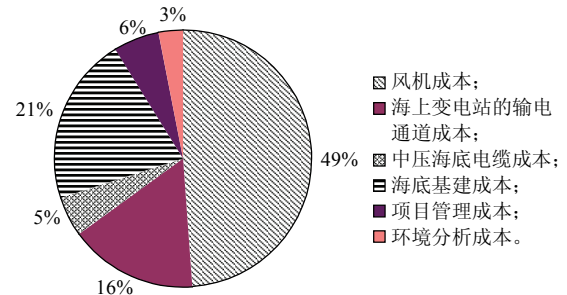


图2 海上风电场建造成本构成

Fig. 2 Construction cost of offshore wind farms

投资成本分析如下^[2,8]:

$$C_{CB} = [C_{CA}(\theta) + C_{CL}]N_{CA}l_{CA} \quad (1)$$

$$C_{SW} = C_{SA}N_{SA} \quad (2)$$

$$C_{CS} = C_{CB} + C_{SW} \quad (3)$$

式中: C_{CS} 为总投资; C_{CB} 为电缆投资; C_{SW} 为开关设备投资; $C_{CA}(\theta)$ 为每km海底电缆成本,一般与电缆截面积 θ 成正比; C_{CL} 为海底电缆的铺设成本; N_{CA} 为海底电缆的数量; l_{CA} 为每根电缆的长度; C_{SA} 为每个开关设备的成本; N_{SA} 为所用开关设备的数量。

3 3种开关配置方案的故障机会成本评估

3种开关设备配置方案的特点如下:传统开关配置方案投资小,可靠性低;开关完全配置方案投

资较大, 可靠性较高; 开关部分配置方案介于上述2种方案之间。因此, 需要比较不同开关配置方案经济性的优劣。

故障机会成本的计算公式如下^[8,11]:

$$E_{\text{LOST}} = \frac{\lambda t_{\text{MTTR}} P_{\text{RATE}} T_{\text{EQUAL}}}{8\ 760} \quad (4)$$

$$C_{\text{LOST}} = \rho E_{\text{LOST}} \quad (5)$$

式中: E_{LOST} 为故障损失的电量; C_{LOST} 为故障机会成本; ρ 为上网电价; λ 为风电场生命周期内的故障次数; t_{MTTR} 为平均故障修复时间; P_{RATE} 为停运风机的额定功率; T_{EQUAL} 为风场年利用小时数。

4 算例参数与成本评估结果

4.1 算例参数

某海上风电场装机容量为240 MW, 单台风机容量为3 MW, 内部电气系统的电压等级为33 kV。风机安装按照8×10排列, 即每行8台风机, 一共10行, 同一行相邻风机的距离 a 为700 m, 行间距 b 为100 m, 如图1(a)所示。

4.2 3种开关配置方案投资成本评估

由式(1)~(3)可知, 投资成本与所用电缆的规格、长度、数量及所用开关设备的数量相关。ABB海底电缆成本的典型值为5 000 元/(mm²·km); 海底电缆的铺设成本一般为50~200 万元/km, 其典型值取100 万元/km^[5]; ABB中压断路器的价格约为10 万元/台。3种开关配置方案对应的设备情况见表1。

表1 3种方案的设备情况
Tab. 1 Equipments data of three configurations

开关配置方案	电缆规格/mm ²	长度/km	开关数量
传统配置方案	185	49	10
完全配置方案	185	49	80
部分配置方案	185	49	20

3种方案的投资成本见表2。由表2可见, 传统配置方案和部分配置方案的投资成本相差不多, 而完全配置方案的投资成本明显增加。

表2 3种方案的投资成本
Tab. 2 The investment cost of three configurations

投资成本	传统配置方案	完全配置方案	部分配置方案
电缆成本/(元/kW)	392	392	392
开关成本/(元/kW)	4	33	8
投资成本/(元/kW)	396	425	400

4.3 3种开关配置方案故障机会成本评估

由式(4)(5)可知, 故障机会成本与生命周期内的故障次数、平均故障修复时间、停运风机的额定功率、年利用小时数和上网电价相关。根据丹

麦海上风电场的运行经验, 可以得到如下故障机会成本^[8]:

$$C_{\text{LOST}} = 604\lambda P_{\text{RATE}} = 1.2lP_{\text{RATE}} \quad (6)$$

式中 l 为电缆总长度。

传统开关配置方案中, 停运风机的额定功率 $P_{\text{RATE}} = 3\ 000 \times 8 = 24$ MW。完全开关配置方案的停运风机的额定功率 $P_{\text{RATE}} = \frac{1}{8} \times \sum_{N=1}^8 3\ 000 N = 13.5$ MW。

部分开关配置方案的停运风机的额定功率 $P_{\text{RATE}} = (0.5 \times 8 + 0.5 \times 4) \times 3\ 000 = 18$ MW。

根据式(6)对3种开关配置方案故障机会成本进行计算, 结果如表3所示, 表中总成本为表2中的投资成本与表3中的故障机会成本之和。由表3可知, 完全配置和部分配置方案的故障机会成本比传统配置方案的有所降低。

表3 3种方案的故障机会成本和总成本
Tab. 3 The failure opportunity cost and the total cost of three configurations

成本	传统配置方案	完全配置方案	部分配置方案
故障机会成本/(元/kW)	60	34	45
总成本/(元/kW)	456	459	445

5 3种开关配置方案成本的灵敏度分析

5.1 开关设备成本变动对总成本的影响

3种方案投资成本的差异主要由开关设备的投资成本不同造成。在海上安装断路器有难度, 因此海上断路器的价格可能大大高于目前陆上的市场价格, 而随着海上风电场的增多, 断路器生产标准化、规模化和国产化必将提高, 因此价格可能有所回落。假定断路器价格范围为5~20 万元, 上述算例中的总成本变化如图3所示。

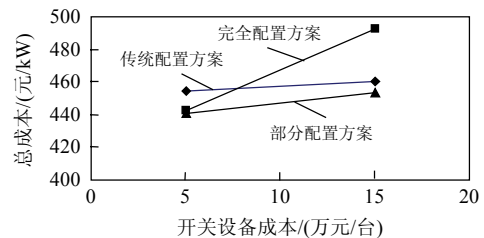


图3 开关设备成本变动对总成本的影响

Fig. 3 Impact of varied switchgear cost on the total cost

由图3可知, 3种方案的经济性与开关设备成本关系密切: 在开关设备成本变动的范围内, 部分配置方案的经济性始终最优; 当开关设备成本大于8 万元/台时, 传统配置方案的经济性优于完全配置方案。

5.2 故障率和故障修复时间变动对总成本的影响

电缆故障率和故障维修时间对总成本影响较

大, 假定海底电缆故障率为 $0.1\sim 0.3$ 次/ $(10^5\text{m}\cdot\text{a})$ ^[10-11], 停机时间为 1~6 个月^[12], 上述算例中的总成本变化分别如图 4 和 5 所示。由图 4 可知: 在电缆故障率变动范围内, 开关部分配置和完全配置方案都优于传统开关配置方案; 当电缆故障率小于 0.24 次/ $(10^5\text{m}\cdot\text{a})$ 时, 部分配置方案比完全配置方案更经济; 当电缆故障率大于 0.24 次/ $(10^5\text{m}\cdot\text{a})$ 时, 完全配置方案的总成本比部分配置方案的略低。由图 5 可知, 当电缆故障维修时间大于 2 个月时, 部分开关配置方案经济性最好; 当电缆故障维修时间小于 2 个月时, 传统配置方案的总成本比部分配置方案的略低。

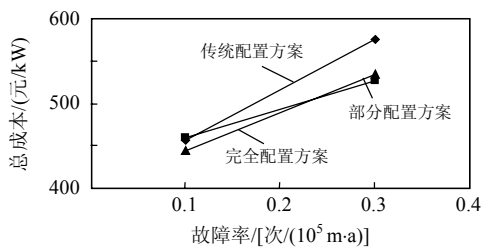


图 4 电缆故障率变动对总成本的影响

Fig. 4 Impact of varied failure rate of cables on the total cost

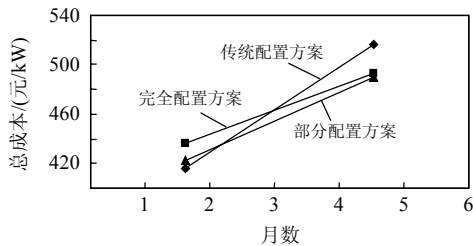


图 5 电缆故障维修时间变动对总成本的影响

Fig. 5 Impact of varied maintenance time to repair of cables on the total cost

6 结论

1) 在典型参数下, 开关部分配置方案的经济性最好, 开关传统配置方案的经济性次之, 开关完全配置方案的经济性最差。

2) 在开关成本、电缆故障率及故障维修时间等要素的变动范围内, 与开关传统配置方案和完全配置方案相比, 开关部分配置方案的经济性更好或者相差不多。

3) 从经济性角度看, 开关部分配置方案是 3 种开关配置方案中的最优选择。

参考文献

- [1] Lemming J K, Morthorst P E, Clausen N E. Offshore wind power experiences, potential and key issues for deployment[C]. IEA Workshop on Offshore Wind Power; Experiences, Potentials & Key Issues for Deployment, Berlin, Germany, 2007.
- [2] Morthorst P E. Economics of offshore wind power[C]. IEA Workshop on Offshore Wind Power; Experiences, Potentials & Key Issues for Deployment, Berlin, Germany, 2007.
- [3] 黄东风. 欧洲海上风电的发展[J]. 能源工程, 2008(2): 24-27. Huang Dongfeng. The survey of off-shore wind power development in Europe[J]. Energy Engineering, 2008(2): 24-27(in Chinese).
- [4] 陈炳森, 胡华丽. 我国风电发展概况及展望[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 272-275. Chen Bingsen, Hu Huali. General situation and prospect of wind power in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 272-275(in Chinese).
- [5] Quinonez V G, Ault G W, Anaya L O, et al. Electrical collector system options for large offshore wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(2): 107-114.
- [6] Ault G W, Gair S, McDonald J R. Electrical system designs for the proposed IGW beatrice offshore wind farm[C]. Fifth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Glasgow, Scotland, 2005.
- [7] Morgan C A, Snodin H M, Scott N C. Offshore wind economies of scale, engineering resource and load factors[R]. Garrad Hassan & Partners Report, 2003.
- [8] 王建东, 李国杰. 海上风电场内部电气系统布局经济性对比[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 99-103. Wang Jiandong, Li Guojie. Economic comparison of different collector networks internal electrical system layouts from offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 99-103(in Chinese).
- [9] Gardner P, Craig L M, Smith G J. Electrical systems for offshore wind farms[R]. Garrad Hassan & Partners Report, 2000.
- [10] Hopewell P D, Castro-Sayas F, Bailey D I. Optimizing the design of offshore wind farm collection networks[C]. Universities Power Engineering Conference, Manchester, 2006.
- [11] Scutariu M. Techno-economical optioneering of offshore wind farms electrical systems[J]. IEEE on Power Technology, 2007, 1(5): 2195-2200.
- [12] Ribrant J, Margareta B. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997—2005[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 167-173.



王建东

收稿日期: 2009-12-07。

作者简介:

王建东(1983—), 男, 工程师, 研究方向为风力发电;

李国杰(1965—), 男, 副教授, 从事电力系统分析与控制、新能源及电能质量的研究工作,

E-mail: liguojie@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 杜宇)