

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.013

海上风电场工程集电系统拓扑设计研究

谭任深

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 海上风电场的集电系统设计是电气专业设计的一个重要内容, 集电系统的拓扑布局和开关配置设计对整个集电系统的经济性和可靠性影响很大。广泛调研了国内外主要研究和工程成果, 分析对比了集电系统的多种布局和开关配置设计, 结合案例给出了适合案例工程情况的集电系统总体设计方案, 并展望了未来大容量, 远距离海上风场的集电系统方案设计趋势。

关键词: 海上风电场; 集电系统; 布局方案; 开关配置

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0067-05

Research on the Topology Design of Offshore Wind Farm Collection System

TAN Renshen

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The topology design of collection system is an important part of electric design of offshore wind farm. The layout and switch configuration have a great influence on the economy and reliability of the collection system. By surveying the research and project achievements overall world, several kind of layouts and switch configurations of collection system are analyzed and compared in this article, then a proper solution to the wind farm case is given, as to the offshore wind farm in the future which has large capacity and long distance. The article prospects the trend of collection system design.

Key words: offshore wind farm; collection system; layout design; switch configuration

由于海上风资源条件较好, 具有平均风速高, 风电场平均出力大, 不占用陆地资源等优势, 近年来海上风电场在全球范围内迅速发展^[1-2]。集电系统是海上风场内部最基本的电气系统, 将所有风机发出的电能汇集到升压站, 再输送至电网。作为海上风场连接风机和电网的重要组成部分, 集电系统的经济可靠运行对电网和整个海上风电场的安全经济运行有着重要意义, 它的拓扑研究与优化设计受到了国内外的广泛关注。

在风机位置确定的情况下, 集电系统拓扑布局形式和开关配置方案是集电系统优化设计的重点。本文在研究国内外工程关于集电系统的设计方案基础上, 重点对集电系统的拓扑布局形式和开关配置

进行研究, 分析对比得出适合工程应用的集电系统拓扑方案。

1 研究现状

集电系统的作用是将风机的电能汇集起来, 经升压站升压输送到电网。它包括电缆、开关、风机等主要设备。关于集电系统拓扑结构的设计方案, 国内外进行许多的研究, 主要集中在拓扑布局研究、拓扑开关配置研究、拓扑电气性能研究以及集电系统输电方式比较等方面。本文将主要关注实际工程中集电系统拓扑布局和开关配置方案的选择。

在拓扑布局研究方面, 国内外的研究人员提出了放射形、环形、星形三种主要的拓扑布局结构, 其中环形又可以分为单边环形, 双边环形和复合环形。研究中分别对以上几种布局形式进行了经济性、可靠性和电气性能的比较^[3-7]。

在拓扑开关配置研究方面, 研究人员提出了传

收稿日期: 2015-05-26

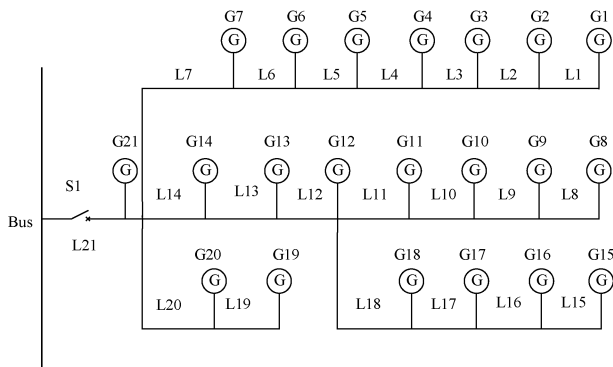
作者简介: 谭任深(1988), 男, 湖南湘潭人, 工程师, 硕士, 主要从事风电, 火电, 燃气电厂设计和研究(e-mail)tanrenshen@gedi.com.cn。

统开关配置、完全开关配置、部分开关配置三种开关配置方案^[8-10]，下面以放射形集电系统拓扑为例，分别对三种开关配置方案进行介绍。

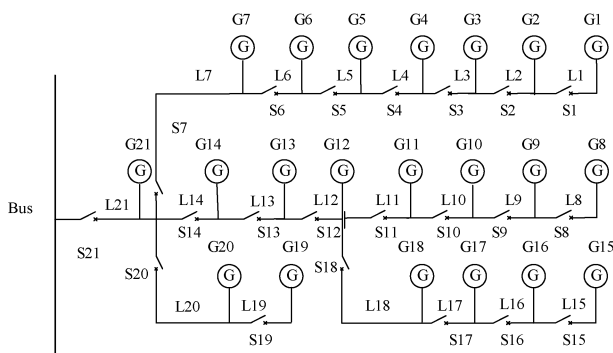
传统开关配置方案如图1(a)所示，该方案中风机与风机之间只有电缆进行连接，开关设备仅安装在集电电缆接入汇流母线入口处。这种布局的优点是设计简单且投资成本低，缺点为可靠性不高，一旦集电电缆发生故障，该树形结构上所有风机都将停运。

完全开关配置方案如图1(b)所示，该方案中风机与风机之间都以电缆和开关连接，这种开关配置方案的成本较高，但可靠性提高，一旦电缆或开关发生故障，可以通过开关将故障点下游的风机切除，而其余风力发电机仍可正常运行。

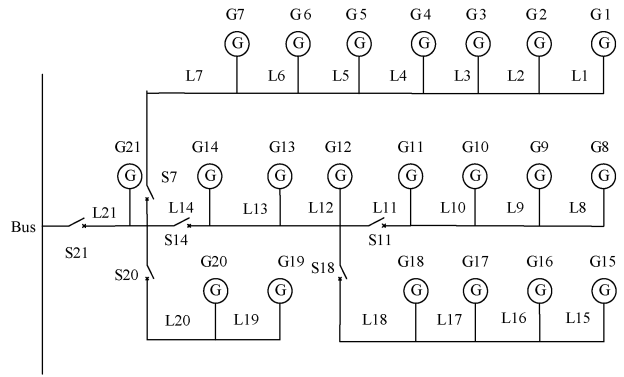
部分开关配置方案如图1(c)所示，该方案是中开关设备仅装在放射形拓扑中下游风机分叉出口处和集电电缆接入汇流母线入口处。一旦集电电缆发生故障，该串上的所有风机都将停运，但不会影响其他串风机的正常运行。该方案的投资成本和可靠性都介于开关传统配置和开关完全配置之间，是一种折中的开关配置方案。



(a) 传统开关配置方案



(b) 完全开关配置方案



(c) 部分开关配置方案

图1 海上风电场集电系统三种主要的开关配置方案

Fig. 1 The Three Main Switch Configuration Design in Offshore Windfarm Collection System

海上风电场在国外发展迅速，特别是欧洲的英国、德国、丹麦等国家新建了大批的海上风电场，在这些海上风电场中间，集电系统布局大多采用放射形布局，也有个别的海上风电场采用环形的布局。集电系统开关配置方面，大多数风电场采用传统开关配置方案，少部分的海上风电场采用了完全开关配置方案，但随着欧洲往深海区域发展大规模海上风电场，完全开关配置方案正在受到越来越多的关注和应用。根据国外工程设计经验，集电系统若在对可靠性要求高，且投资预算充足的情况下，建议采用环形布局加完全开关配置。若经济预算投资较紧张且考虑到海底电缆故障率小，采用放射形布局加传统开关配置便能够满足工程实际要求。

国内工程中，由于海上风电场发展在国内刚刚起步，目前在建和建成的海上风电场不多。目前国内陆地风电场中，集电系统多采用放射形布局加传统开关配置。而已建成或在建的海上风电场中，国内在集电系统拓扑布局方面全部采用放射形布局，开关配置中既有完全开关配置方案也有传统的开关配置方案。其中东海大桥二期工程等海上风电场采用的为完全开关配置方案。我院珠海桂山海上风电场采用的是传统开关配置方案。

2 现有方案对比分析

海上风电场集电系统拓扑布局和开关配置设计是集电系统方案设计的重要部分，下面对各种方案进行对比分析，为以后的工程选取合适的集电系统设计方案做好准备。

海上风电场集电系统拓扑布局主要有放射形、环形和星形三种形式。表1从电气性能、设备投资、可靠性程度、实施性难度、应用场合这些方面对这三种主要拓扑布局方案进行分析对比。

海上风电场集电系统拓扑开关配置方案主要有传统开关配置,完全开关配置,部分开关配置三种形式。表2从设备投资、可靠性程度、实施性难度、应用场合这些方面对这三种主要开关配置方案进行分析对比。

在完全开关配置和部分开关配置方案中,开关既可以是断路器,也可以是负荷开关或者可控的隔离开关。断路器价格高,但海底电缆故障时,断

路器可以在有故障电流时跳开,故障点之前的风机无需短暂停止供电。负荷开关或者隔离开关造价低,但海底电缆故障时,需要在集电线路首端的断路器断开,远程断开故障点之前的负荷开关或隔离开关后,再合上集电线路首端的断路器,恢复供电,这个过程中风机需要短暂停止供电。

海上风电场集电系统的布局方案中,放射形布局投资少,结构简单,能够满足可靠性要求,所以国内外工程中应用场合较多。环形布局虽然可靠性高,但是投资成本远大于放射形布局,经济性不好。环形布局方案只适用于各个方向的风资源分布均匀的场合,在经济性和实施简便性上比不上放射

表1 集电系统三种主要的布局方案的对比分析

Table 1 The Contrastive Analysis Among the Three Main Layout Configuration in the Offshore Windfarm Collection System

性能	放射形	环形	星形
电气性能	电能损耗最大,电压偏差损耗最大。继电保护配置简单。	电能损耗最小,电压偏差损耗最小。继电保护配置也相对复杂。	电能损耗、电压偏差损耗为前两种布局的中间。继电保护配置相对简单。
适用的开关配置方案	适合采用传统、完全、部分三种开关配置方案	适合采用完全开关配置和部分开关配置。	适合采用完全开关配置和传统开关配置。
设备投资	电缆长度最短,风机间电缆截面逐渐增大,整体投资最小。	由于需要比放射形多一倍长度的电缆,而且电缆截面也为最大,所需开关数量最多,所以投资最大,为放射形的2~4倍之间。	电缆长度较短,电缆截面较小,所需开关数量较多,整体投资在放射形和环形之间。
可靠性程度	可靠性程度最低,但一般能满足运行要求。	可靠性程度最高	可靠性程度在放射形和环形之间
实施性难度	风机间接线灵活,结构简单,电缆和开关设备最少,施工工作量较小,实施性难度较小。	风机间接线较复杂,结构较复杂,电缆和开关设备最多,施工工作量较大,实施难度相对较大。	风机布点需满足星形连接,设备数量较多,实施性难度在放射形和环形之间。
应用场合	在陆地和海上风电场中应用广泛	应用很少,在可靠性要求很高的场合应用。	应用很少,在特殊风资源情况下的风电场中有应用。

表2 集电系统三种主要的开关配置方案的对比分析

Table 2 The Contrastive Analysis Among the Three Main Switch Configuration in the Offshore Windfarm Collection System

性能	传统开关配置	完全开关配置	部分开关配置
设备投资	所用开关最少,设备投资最小。继电保护配置简单。	每台风机需要多配置一个开关(断路器、负荷开关或隔离开关),设备投资最大。继电保护配置复杂,每段集电海缆需配置差动保护。	若干台风机需要多配置一个开关(断路器、负荷开关或隔离开关),继电保护将复杂,需要配置集电电缆差动保护设备,投资在传统和完全开关配置房间之间。
可靠性程度	可靠性程度最低,但一般能满足可靠性要求。当海底电缆故障,会失去整条风机的负荷。	可靠性程度最高,当某段海底电缆故障,只会失去最少的风机负荷。	可靠性程度在传统和完全开关配置房间之间。当某段海底电缆故障,只会失去部分的风机负荷。
实施性难度	设备最少,结构简单,实施难度最小。	设备最多,每台风机平台上多出一个开关和开关柜,结构相对复杂,实施难度最大。	设备数量居中,实施难度在传统和完全开关配置房间之间。
应用场合	在陆地和海上风电场中应用广泛。适合陆地,潮间带,以及近海风电场。	目前应用较少,仅在欧洲少数海上风电场应用。适合应用于远海,大容量的海上风电场,以及对可靠性要求较高的场合。	适合应用陆地和海上风电场,但目前尚无应用案例。

形布局方案。因此建议在以后的海上风电场中使用放射形的布局方案。经济允许而可靠性要求特别高时可考虑采用环形布局方案。

海上风电场集电系统的开关配置方案中,考虑到潮间带和近海风电场运营维护相对简单,深海大规模风电场运营维护困难,可靠性要求更高,建议在潮间带和近海的海上风电场采用传统开关配置或部分开关配置。在深海、大容量的海上风电场采用完全开关配置。

3 工程案例析

实际的集电系统拓扑方案包括了拓扑布局方案和开关配置方案,即最终方案是两个方面的组合,上节分析了各种方案的优劣,集电系统拓扑设计方案的选择需要根据工程具体的情况来决定采用何种布局方案和开关配置,使得设计方案在经济性、可靠性和实施性方面均能达到工程的实际要求。广东省电力设计研究院开发了“海上风电场集电系统设计软件”,通过软件分析,可得出可靠性、经济性兼优的集电系统拓扑优化流程图见图2,具体方法可以参见文献[8]。

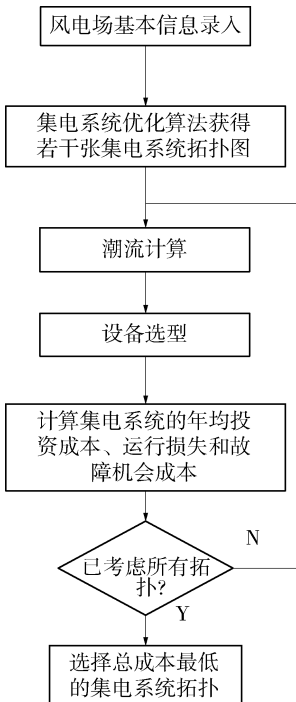


图2 集电系统拓扑优化方法

Fig. 2 The Optimization Method of Offshore Windfarm Collection System

某规划中的海上风场进行集电系统拓扑如图3所示,该海上风电场规划运行25年,装机容量195 MW,共由65台3 MW的风力发电机构成,设有一个升压站,集电系统内部电压等级35 kV,风电场的年平均风速为7 m/s。

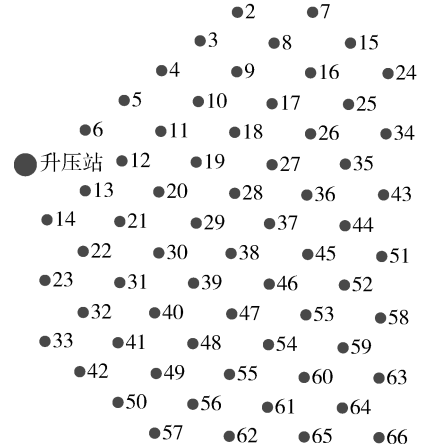


图3 案例风电风机布点图

Fig. 3 The Wind Turbine Location Distribution of the Case of Offshore Windfarm

风电场有主导风向,且从风电场风机的布点来看,集电系统拓扑不适合采用星形接线。用软件进行计算,采用环形布局和放射形布局电缆的投资分别是3亿元和1.1亿元,环形布局是放射形的近3倍,经济性方面劣势明显,所以集电系统拓扑布局方案选为放射形布局。

开关配置方案方面,通过软件计算得到经济性参数如表3所示,其中故障机会成本是指集电系统中因电缆或开关故障而损失的发电经济效益^[5-6]。

表3 案例风电场3中开关配置方案经济性一览表

Table 3 Economic Contrastive Analysis Among the Three Main Switch Configuration in the Case of Offshore Windfarm Collection System

万元				
方案	电缆投资	开关投资	故障机会成本	总成本
传统开关配置	11 000	210	40 100	51 310
完全开关配置	11 000	1 950	36 500	49 450
部分开关配置	11 000	510	38 000	49 510

从上表可以看到不同的开关配置方案,开关投资和故障机会成本不一样,传统开关配置方案开关投资最小,但可靠性低,因故障造成的故障机会成本也最大。完全开关配置方案开关投资最大,但可靠性高,因故障造成的故障机会成本最小。部分开

关配置则是介于前两种开关配置之间。对于案例中的风电场,采用完全开关配置和部分开关配置方案总成本相近,比较传统开关配置方案总成本要有明显优势。因此,为了提高集电系统的可靠性,可以选用放射形布局下的完全开关配置或部分开关配置。

对于本文计算案例的海上风电场,风电场离岸15 km,海底水深1~10 m,工程规划装机65×3 MW(共计195 MW)风电机组,该海上风电场属于较大容量的风电场,离岸有一定的距离,通过计算发现开关配置方案对集电系统总成本的影响较大。随着风电场容量的增大,完全开关配置和部分开关配置的总经济成本优势将更加明显。

未来海上风电场将往大容量、远距离的趋势发展,运营维护困难,对风电场的可靠性要求更高,集电系统宜采用放射形的拓扑布局,开关配置方案宜采用部分开关配置或完全开关配置方案。这样既提高电气系统的可靠性,方便了风电场的运营维护,同时也尽量减少工程投资,使得集电系统的经济性和可靠性得到综合的最优设计。

4 结论

海上风场的集电系统设计,关系着电网和整个海上风场的安全经济运行。本文围绕集电系统的拓扑布局和开关配置方面进行分析,可以看出放射形的拓扑布局结构简单,投资少,风机间接线灵活,实施性好,有很好的应用前景;完全开关配置和部分开关配置可以有效提高集电系统的可靠性,在未来大容量、远距离、运营维护困难的海上风电场中将会得到越来越多的应用。

参考文献:

- [1] CAMM E H, BEHNKE M R, BOLADO O, et al. Wind Power Plant Collector System Design Considerations: IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group [C]// PES General Meeting. Calgary: IEEE, 2009: 1-7.
- [2] GONZALEZ-LONGATT F M. Optimal Electric Network Design for a Large Offshore Wind Farm Based on a Modified Genetic Algorithm Approach [J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1):

- 164-172.
- [3] QUINONEZ V G. Electrical Collector System Options for Large Offshore Wind Farms [J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(2): 107-114.
- [4] 靳静,艾芊,奚玲玲,等.海上风电场内部电气接线系统的研究[J].华东电力,2007,35(10):20-23.
JIN Jing, AI Qian, XI Lingling, et al. Internal Electrical Wiring Systems of Offshore Wind Farms [J]. East China Electrical Power, 2007, 35(10): 20-23.
- [5] 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 for Offshore Wind Farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 99-103.
- [6] 王建东,李国杰.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[J].电网技术,2010,34(2):125-128.
WANG Jiandong, LI Guojie. Economic Study on Switchgear Configuration in Electrical Systems of Offshore Wind Farms With Cable Outage [J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 125-128.
- [7] FRANKEN B. Collection Grid Topologies for Off-shore Wind Parks in Electricity Distribution [C]//18th International Conference and Exhibition. Turin: IET, 2005: 1-5.
- [8] 谭任深.海上风电场集电系统的优化设计与研究[D].广州:华南理工大学,2013.
TAN Renshen. The Study on the Optimal Design of Offshore Wind Farm Collection System [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [9] 黄玲玲,符杨,郭晓明.海上风电场集电系统可靠性评估[J].电网技术,2010,34(7):169-174.
HUANG Lingling, FU Yang, GUO Xiaoming. Reliability Evaluation of Wind Power Collection System for Offshore Wind Farm [J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 169-174.
- [10] 谭任深,杨苹,贺鹏,等.考虑电气故障和开关配置方案的海上风电场集电系统可靠性及灵敏度研究[J].电网技术,2013,37(8):2264-2270.
TAN Renshen, YANG Ping, HE Peng, et al. Analysis on Reliability and Sensitivity of Collection System of Offshore Wind Farms Considering Electrical Faults and Switchgear Configurations [J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2264-2270.

(责任编辑 黄肇和)