

大容量岸电系统接入电网的影响及优化策略研究

郭元战¹, 魏云冰¹, 李长庆¹, 袁全宁²

(1. 上海工程技术大学, 上海 201620; 2. 上海浦海求实电力新技术有限公司, 上海 200093)

摘要: 针对大容量岸电系统并网给电网运行带来的负荷波动大、电能质量差等一系列问题, 提出了一种经济高效的补偿方案, 旨在提高电网运行的稳定性和安全性。通过研究大容量岸电接入后电网的稳定性, 包括岸电功率的波动性, 对电网无功功率分布的影响以及系统电压、网损、潮流分布的影响等, 建立了大容量岸电的出力模型, 对船舶负荷接入的配电网运行状态进行了仿真。仿真结果表明, 该方案可提高岸电接入系统的安全稳定性和电能质量, 为促进岸电的快速发展和绿色港口的建设提供参考。

关键词: 船舶; 岸电系统; 电网影响; 无功配置

Research on the influence and optimization strategy of a large capacity shore power system connecting to power grid

GUO Yuanzhan¹, WEI Yunbing¹, LI Changqing¹, YUAN Quanning²

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Puhai Qiushi Electric Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: There are a series of problems such as large load fluctuations and poor power quality caused by the grid connection of large-capacity shore power systems to the grid operation. A cost-effective compensation scheme is proposed to improve the stability and safety of grid operation. The stability of the power grid after large-capacity shore power access, including the volatility of shore power, the impact on the reactive power distribution of the power grid, and the influence of system voltage, network loss and power flow distribution, is studied. On this basis, the output of a large-capacity shore power model is established and the operational status of the distribution network with ship load access is simulated. The simulation results show that the scheme can improve the security and power quality of the shore power access system, and provide a reference for promoting the rapid development of shore power and the construction of green ports.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507157).

Key words: ships; shore power system; grid impact; reactive power configuration

0 引言

随着提倡节约减排、绿色环保的呼声越来越高, 国家电网公司开始大力倡导“以电代油、以电代煤、电从远方来”的能源利用新型模式。船舶靠岸使用岸上电源供电, 是减少环境污染的一项重要技术, 船舶使用岸电系统供电能有效地降低噪音污染、节能减排^[1-2]。大规模岸电电源并网也会给电网的运行带来很多不稳定因素。船舶从停靠港口到离开港口的过程中, 船舶带来的负载从无到有, 这样的冲击

性负荷接入系统后, 将会对电网的稳定性造成危害。

文献[1]中给出了国际上通用的岸电供电方式, 大体上包括: 高压岸电/高压船舶、高压岸电/低压船舶、低压岸电/低压船舶三种供电方式。船舶用电的交流电制主要形式为: 三相交流 6.6 kV/60 Hz、三相交流 440 V/60 Hz 和 400 V/50 Hz。针对船舶岸电无缝并网过程中出现的问题, 文献[3]中提出了一种船舶岸电电力系统故障诊断的数学模型, 来分析岸船电力系统的综合影响。本文对区域内岸电系统特性进行研究, 建立适合大容量岸电的出力模型, 并分析岸电出力与系统负荷特性的关系^[4]。电网大容量岸电接入后的稳定性分析, 包括岸电功率的波动性,

对电网无功功率分布的影响,对系统电压、网损及潮流分布的影响。针对以上问题的研究给出了船舶负荷接入配电网的无功配置优化策略^[5-6]。

1 无功补偿优化算法

供电系统的无功补偿装置主要由并联电容器、调相机、静止无功补偿器组成^[7]。并联电容器自身有功功率损耗很小,只占其无功容量的0.5%不到。并联电容无功补偿装置主要包含电容器组和控制器两个部分,控制器的作用是调节电容器组的投入和切除。现有的无功功率自动补偿装置还存在一些缺陷,即在初始状态时,功率因素还没有达到投入门限时,电容器组就进行了投入,而此时电容器组的投入很容易造成无功补偿过度的情况,这时再马上切除电容器组,来回反复就造成了“投切震荡”问题,因此对投切算法进行了优化^[8]。并联电容器无功补偿关系如图1所示。

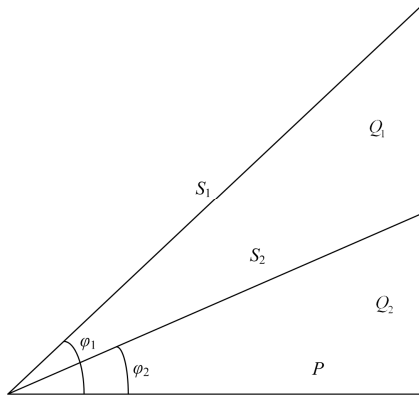


图1 无功补偿关系图

Fig. 1 Reactive power compensation diagram

其中 P 是有功功率, S_1 是补偿前视在功率, Q_1 是补偿前无功功率, Q_2 是补偿后无功功率, φ_1 是补偿前的功率因数角, φ_2 是补偿后的功率因数角。无功功率自动补偿器可以测定 φ_1 、 U 以及经过电流互感器变比的 I ,可以得到如下关系:

$$S_1 = KUI \quad (1)$$

$$Q_1 = S_1 \sin \varphi_1 \quad (2)$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_c \quad (3)$$

$$P^2 + Q_1^2 = S_1^2 \quad (4)$$

由式(1)一式(3)可以求出 S_1 ,由式(4)可以知道有功功率 P 和视在功率 S_1 之间的关系,因此可以得出功率因数:

$$\cos \varphi_2 = \frac{KUI \sin \varphi_1 - Q_c}{\sqrt{(KUI)^2 - 2KUIQ_c \sin \varphi_1 - Q_c^2}} \quad (5)$$

式(5)中若已知互感器变比 K 及电容器容量 C ,则可以通过已知参数、测量量求出补偿后的功率因数。该算法可以准确预判投入、切除电容后的功率因数,使投入电容组数精确跟踪负载变化^[9-10]。

2 岸电系统基本结构

岸电即岸上电源,指船舶在停靠期间,可以从岸上获得供其水泵机组、通信设备、通风管道、照明工具和其他设备运行所需的电力^[11-12]。岸电系统由岸电变电所、岸上电源设备、接收装置以及电缆等连接在一起组成,船舶岸上电源可根据船舶吨位不同和所需电压等级进行划分,可划分为高电压岸电系统和低电压岸电系统^[13]。

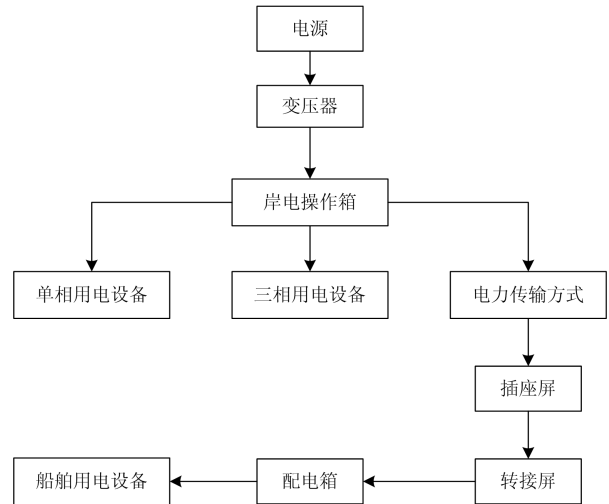


图2 岸电系统结构图

Fig. 2 Shore power system structure

如图2所示,陆上电网供电系统和船舶配电系统结合在一起就构成了岸电系统。陆上供电部分主要包含连接船舶的插座设备和电缆,岸电部分主要包含码头电缆插座屏、转接屏和配电箱等^[14-15],通过主配电板将岸电电源向整个船舶电网供电。

3 岸电接入后对电网的影响

船舶负荷的接入对电网来说,是一个很大的冲击负荷突然并网,船舶负荷的变化,可引起电源电压的变化,导致岸电配电网系统电压不稳定。本文以上海吴淞口码头岸电系统为例,该岸电系统是由35 kV 邮轮岸电1号主变经降压后供电。该主变上级电源为220 kV 同济2号主变,两者之间的连接线路为35 kV 线路同海3620和35 kV 线路海岸3C039。

电气接线模型如图 3 所示。

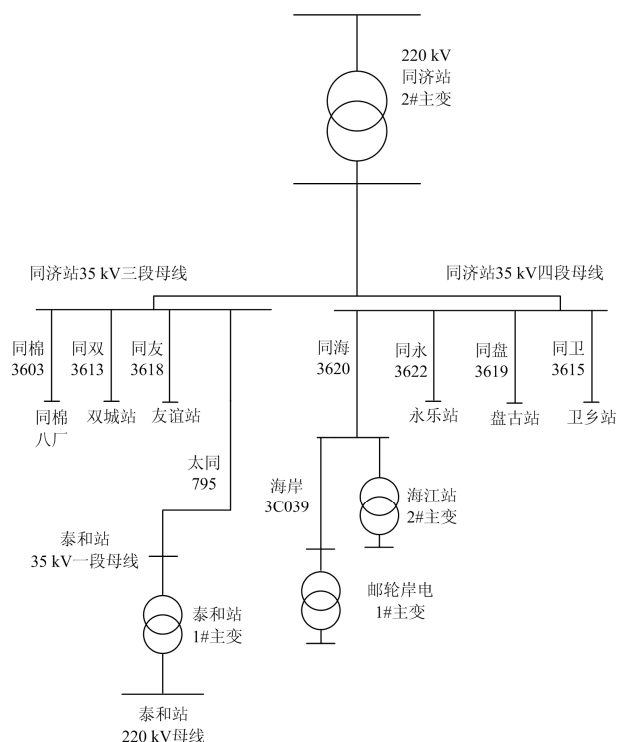


图 3 吴淞口码头电气接线模型图

Fig. 3 Electrical wiring model diagram of Wusongkou terminal

本文测量了2018年8月11号当天,上海吴淞口国际邮轮港船舶接入岸电时的负荷变化,图4给出了负荷曲线变化趋势。

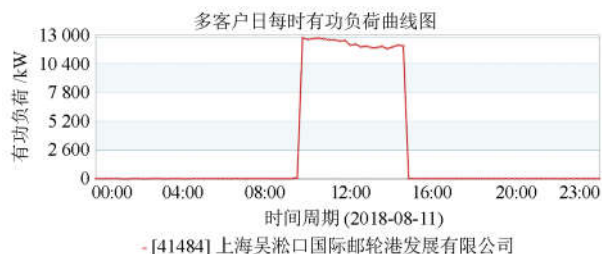


图 4 2018 年 8 月 11 号吴淞口接入岸电负荷曲线

Fig. 4 Wusongkou access to shore power load curve
on August 11th, 2018

由图 4 曲线可知, 船舶接入时, 负荷不是缓慢上升, 而是直线迅速上升, 是一个快速变化的过程, 对电力系统而言, 具有一定的冲击作用; 船舶停靠时间为 6 h 左右, 最大接入岸电负荷为 13 MW 左右。船舶接入岸电期间, 负荷呈现较小波动。

图 5 是单泊位接入岸电的有功无功负荷曲线, 每艘船接入岸电的时间一般在 07:00—21:00 之间, 每次接入 7~9 h, 周期为 24 h, 共 7 天。图 6 是两

个泊位同时接入岸电的有功无功负荷曲线。两个泊位上的船舶接入岸电的时间在 07:00—21:00 之间, 每次接入 7~9 h。由图 5 可知, 单泊位接入岸电的情况属于 0、1 状态, 也就是从无到有, 从有到无的过程, 接入期间会因船上的各类用电负荷的使用情况存在小范围的波动。而两个泊位交叉接入的情况, 用电负荷存在叠加情况, 呈现出较大的波动。

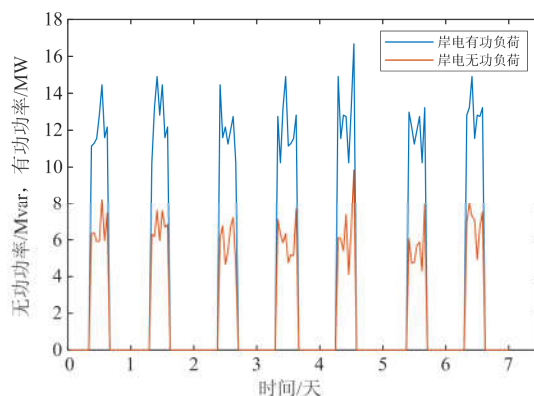


图 5 单艘船接入岸电的有功、无功负荷曲线

Fig. 5 Active and reactive load curve of a single ship entering shore power

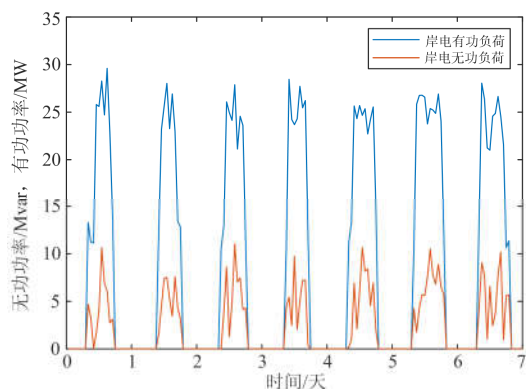


图 6 两泊位交叉接入岸电时的负荷情况

Fig. 6 Load situation when two berths are cross-connected to shore power

采用的数据为 2018 年 9 月 17 号至 9 月 23 号共 7 天的有功负荷数据。图 7 是不接入船舶岸电负荷的时候, 系统的负荷特性。从图 7 可看出, 7 天内各站的负荷变化均较有规律, 且规律大体相同, 基本走势都是 07:00—12:00 为第一个高峰时期, 接着会有一个短暂的下降趋势, 到 13:00—15:00 会再出现一个高峰期, 然后再缓慢下降。因此以海江站为例, 图 8 详细列出了海江站 7 天的有功负荷曲线。

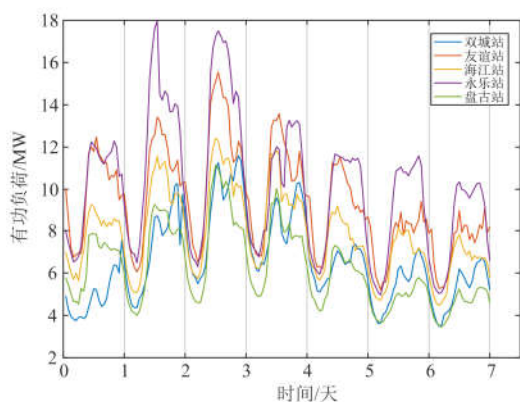


图 7 不接船舶负荷时各站的负荷曲线

Fig. 7 Load curve of each station when the ship load is not connected

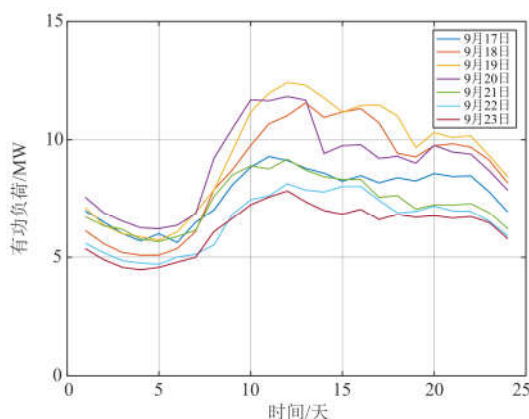


图 8 海江站 7 天有功负荷曲线

Fig. 8 Active load curve of 7 days of Haijiang Station

4 岸电接入电网稳定分析及优化策略

4.1 电网安全稳定分析

岸电系统在运行过程中伴随着无功功率的快速变化, 大容量的岸电负荷接入配电网若缺少相应的无功补偿设备, 将会造成配电网的无功流动的剧烈变化, 从而影响配电网的电压质量^[16-17]。建立邮轮岸电的简易模型对电压质量进行分析, 该 35 kV/10 kV 变压器为岸电专用变压器, 为靠港的邮轮提供电源, 该变压器高压侧同时为其余普通设备供电, 接线图如图 9 所示。

其中邮轮负荷从船载燃油发电机转移到岸电时, 相当于一个较大负荷瞬间投入配电网, 符合冲击负荷的特点。在邮轮未接入岸电时, 邮轮岸电 1 号主变的负荷基本为 0, 当邮轮接入岸电时, 邮轮岸电 1 号主变的功率会急剧增大。实例中的岸电主变根据实测数据其冲击期为毫秒级, 下面给出仅普通设备工作和岸电接入多艘船的不同场景进行分析。

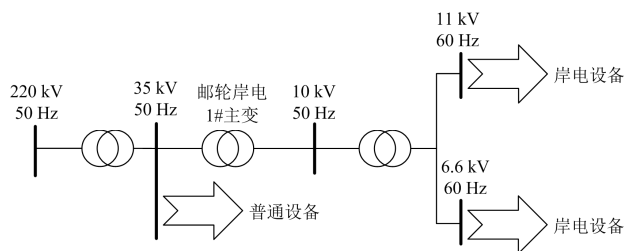


图 9 普通设备及邮轮接入岸电

Fig. 9 General equipment and cruise ship access to shore power

(1) 仅普通设备工作的情况下, 用户侧的负荷功率曲线如图 10 所示。

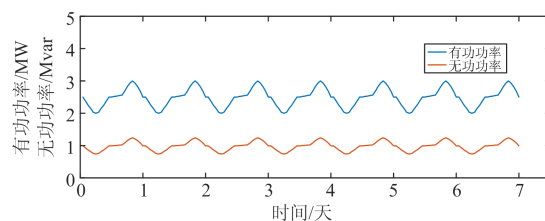


图 10 仅普通设备工作时负荷功率曲线

Fig. 10 Load power curve only when working with ordinary equipment

由图 10 可以看出, 仅普通设备运行, 功率曲线在较短的时间内不会出现太大的波动, 有功负荷维持在 2.5 MW 上下浮动, 而无功负荷在 1 Mvar 上下浮动。

(2) 普通设备与岸电单艘船同时工作

当岸电也投入工作以后, 用户侧的负荷功率曲线如图 11 所示。

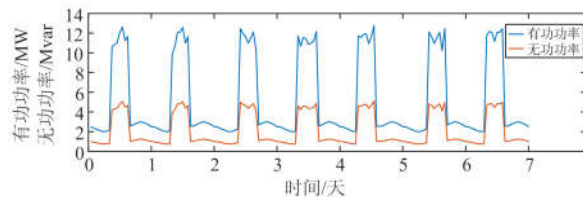


图 11 普通设备和单艘船接入负荷功率曲线

Fig. 11 Curve of general equipment and single ship access load power

由图 11 负荷功率曲线可知, 岸电投入工作后, 用户侧整体的功率为普通负荷与岸电的叠加, 表现为周期性的冲击负荷, 周期即岸电的工作周期 24 h, 平稳期的有功为 2~3 MW, 无功为 1 Mvar 左右。岸电接入后时间内的有功上升到 10~12 MW, 无功也达到了 4 Mvar, 负荷的功率冲击变大。

由图 12 电压曲线可知, 岸电接入配电网后用户侧的电压出现了跌落, 依据潮流计算电压标么值也变低, 岸电的接入确实对电压质量产生了一些影响。

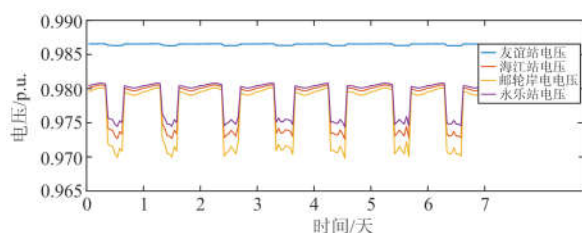


图 12 普通设备和单艘船接入电压曲线

Fig. 12 Curve of common equipment and single ship access voltage

(3) 普通设备与岸电多艘船同时工作

考虑到吴淞口邮轮码头目前已有两个泊位以及今后的扩建计划，未来吴淞口邮轮码头可能会出现多艘船同时使用岸电的情况。由负荷功率曲线可知岸电系统投入工作后，用户侧的功率是普通负荷与岸电的叠加，冲击负荷呈现出周期性的变化，普通负荷平稳期的有功功率为 2~3 MW，无功功率为 1 Mvar 左右；岸电的有功功率为 15~18 MW，无功功率也接近了 7 Mvar，负荷的功率冲击较大。两个码头岸电不同时接入，对配电网的冲击次数快速增加。综合考虑两个码头使用岸电的情况，可以得到其综合负荷功率曲线如图 13 所示。

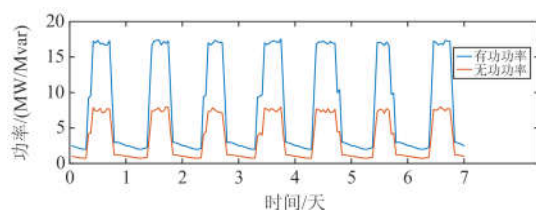


图 13 两艘船同时接入岸电负荷功率曲线

Fig. 13 Power curve of two ships simultaneously connected to the shore power load

依据潮流计算可以得出岸电接入配电网后用户侧的电压出现了跌落，最严重的时候电压标幺值约为 0.97 p.u.，岸电的接入已经对电压质量产生了影响。下面给出电压波动曲线如图 14 所示。

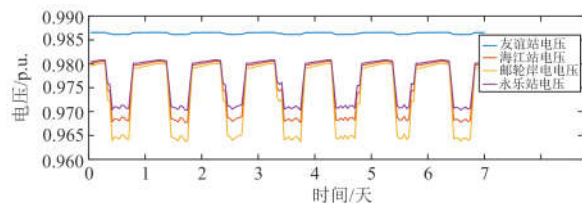


图 14 两艘船同时接入岸电电压曲线

Fig. 14 Curve of two ships simultaneously connected to the shore power voltage

按《GB12325-2008-T 电能质量供电电压允许偏差》规定^[18]，35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%，由图 14 可知，随着负荷的增大，平稳期内电压开始偏离额定值，达到 0.97 p.u.左右，而在冲击期内，电压跌落较大，最严重时为额定值的 0.964 左右，此时电压还在稳定工作范围内。结合吴淞口码头电气图可知，接入岸电负荷时，最靠近邮轮岸电主变的海江站，电压降落最多，降落幅度大约为 0.012；其次为永乐站，电压降低幅度大约为 0.008；友谊站距离邮轮主变最远，其电压降落最少，几乎没有波动，受岸电负荷的影响较小。

考虑到吴淞口码头还可能存在扩建计划，未来将会出现四个码头同时接入岸电的情况，本文对四艘船同时靠岸充电的情况进行了模拟计算，得到电压波动曲线如图 15 所示。

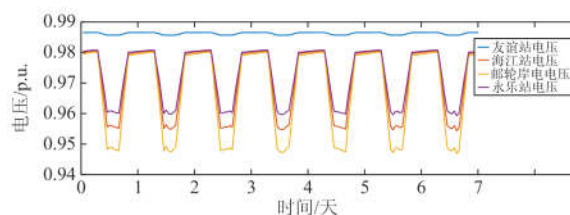


图 15 四艘船同时接入岸电电压波动曲线

Fig. 15 Simultaneous access to shore power voltage fluctuation curves of four ships

通过仿真计算可以得出随着接入岸电数量的增加，用户侧电压波动频率有所升高，同时电压质量更差，当四个码头同时接入岸电时，电压最低达到 0.948，即将影响普通设备的正常运行。

4.2 优化策略

4.2.1 针对冲击负荷的无功配置

目前常用的无功补偿设备有 4 大类，旋转式无功补偿、静止式静态无功补偿、静止式动态无功补偿 SVC、高级动态无功补偿 SVG，各种无功补偿设备工作原理不同，其技术指标与优缺点也不同^[19-21]。固定补偿设备的经济成本相对较低，但可控性较差，动态补偿设备可控性较好，但成本高一点，考虑到岸电负荷是一种较大的冲击负荷，无功功率的变化也是冲击性的，综合考虑以后，动态补偿可以更好地跟踪调节这种变化性的冲击负荷。

为了取得更优化的补偿效果，可以使用组合补偿策略，即平稳期的无功需求可以用固定补偿，冲击变化期用动态补偿，这样既满足了用电需求，又比全部用动态补偿的成本低。这种组合配置策略适用于冲击负荷的无功配置方案，而在动态补偿中

SVC 等基于现代电力电子技术的补偿设备可以实现连续调节,取得更优异的补偿效果。针对岸电这种特殊的冲击负荷的无功配置,平稳期的无功需求决定了固定补偿的容量,冲击期的无功需求和冲击间隔决定了动态补偿的容量,为了避免冲击期的用户侧的电压越限,当冲击间隔较短时,可以采用建议采用 SVC 等基于现代电力电子技术的补偿设备进行补偿^[16,22]。

4.2.2 实例分析

综合分析上述仅接入普通设备和接入不同数量船舶的场景,结合无功补偿优化算法,在每次需要进行无功补偿时对补偿容量进行提前预判计算。对于用户侧平稳期的无功需求,可以选择 FC(3 Mvar)固定补偿方案或者静止同步补偿器(STATCOM),但冲击期内的无功需求要远高于平稳期的无功需求,若考虑到经济效益,在岸电接入期间需再投入至少 1 组 3 Mvar 电容器补偿,表 1 给出了 4 种不同补偿效果的无功配置方案。

表 1 无功补偿配置方案

Table 1 Reactive power compensation configuration scheme

方案编号	无功补偿设备(容量)
1	FC(3 Mvar)
2	FC(3 Mvar)+SVC(3 Mvar), 分 1 组, 单组 3 Mvar
3	FC(3 Mvar)+SVC(6 Mvar), 分 2 组, 单组 3 Mvar
4	静止同步补偿器(STATCOM, 3 Mvar)

由表 1 可知,方案 2 和 3 在固定补偿容量上没有差别,动态补偿都选择了 SVC,单组容量均为 3 Mvar,方案 2 和方案 3 分别配置了 1 组和 2 组,与 SVC 相比,STATCOM 具有无功功率特性、系统稳定性、阻抗特性等方面的优势,而且设备占地面积也较小,但 STATCOM 的控制策略比较复杂,易产生谐波污染,给本就需变频的岸电系统提出了更高的要求。从理论上讲在岸电接入期间投入一组 SVC 即可满足电压考核的要求,因此针对未来可能四个码头同时接入岸电的场景,对前三种方案进行了无功补偿前后的对比仿真,仿真结果如图 16 所示。

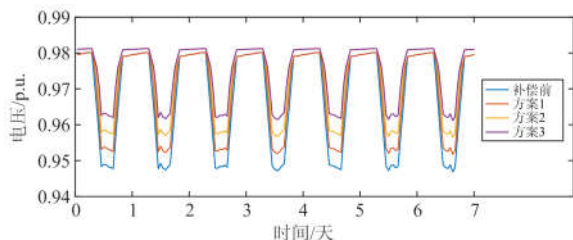


图 16 补偿前后电压波动曲线对比

Fig. 16 Comparison of voltage fluctuation curves before and after compensation

由图 16 可以看出,配置了相应的无功补偿设备后,电压质量比补偿前有明显的提升,最大提升量从原来的 0.948 提升到 0.965,而且方案 3 的提升效果明显好于方案 1。负荷无功需求及 3 种不同方案下补偿设备发出的无功情况如图 17 所示。

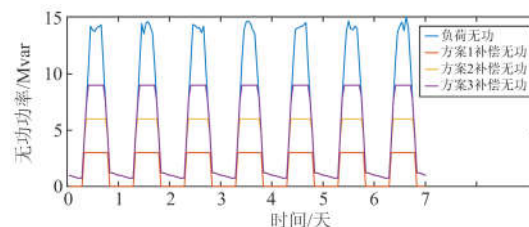


图 17 负荷无功需求及补偿无功曲线

Fig. 17 Curve of load reactive demand and compensation reactive power

由图 17 可知,配置 SVC 补偿后,用户侧电压波动变小趋于平稳,取得了良好的补偿效果。借助 SVC 可以连续调节的优势,选择“FC+SVC”的组合配置策略,可以满足高质量用电要求的用户。通过以上计算和分析可以知道,从无功、时间、变化率等几个岸电冲击负荷维度,分析岸电负荷接入以后对配电网电压质量影响的差异性,可以针对性地选择无功配置方案。固定补偿加动态补偿的组合配置策略表现更好,对后期的岸电接入无功补偿具有指导性的作用^[23-26]。

5 总结

本文分析了大容量岸电接入对电网的安全稳定影响,研究了船舶负荷接入后电网的无功问题,提出了配置无功 3 Mvar FC 和 2 组 3 Mvar SVC 无功补偿优化策略。通过以上分析可知,船舶接入岸电后负荷曲线会较快上升,是一个相对较快的过程,对电力系统具有一定的冲击作用。接入岸电以后,越靠近邮轮岸电主变的变压器,电压降落越多,且接入的船舶负荷越大,有功潮流越大,则系统的有功网损也随之增大。对于大容量岸电接入带来的无功问题,需要配置合适的无功补偿设备。随着接入码头数量的增多,电压跌落随之严重,未来“四船同靠”的情况下,电网同时接入几个较大负载,可能会影响普通设备的正常运行,需及时关注并采取相应措施,确保电力系统安全稳定的运行。

参考文献

- [1] 王金旺. 船舶岸电技术应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

- WANG Jinwang. Research on application of ship shore power technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [2] 肖振锋, 辛培哲, 凌明娟, 等. 我国能源互联网发展模式及规划方案探索[J]. 分布式能源, 2018, 3(5): 1-10.
- XIAO Zhenfeng, XIN Peizhe, LING Mingjuan, et al. Exploration of China's energy internet development model and planning scheme[J]. Distributed Energy, 2018, 3(5): 1-10.
- [3] 朱祥兵, 李垣江, 王建华. 基于二进制莱维风驱动算法的船舶岸电系统并网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 89-96.
- ZHU Xiangbing, LI Yuanjiang, WANG Jianhua. Research on fault diagnosis method for ship shore power system grid-connected based on binary Levi wind drive algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 89-96.
- [4] 张滋华. 含大规模风电电力系统中长期优化运行研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- ZHANG Zihua. Research on medium and long-term optimal operation of large-scale wind power system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [5] 张俊潇, 李桂昌, 黄毅. 考虑地铁接入配电网的无功优化配置策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(5): 142-147.
- ZHANG Junxiao, LI Guichang, HUANG Yi. Research on reactive power optimization configuration strategy considering subway access to distribution network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5): 142-147.
- [6] 撒奥洋, 邓星, 文明浩, 等. 高渗透率下大电网应对微网接入的策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 78-83.
- GAN Aoyang, DENG Xing, WEN Minghao, et al. Strategies for large grids to cope with microgrid access under high permeability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 78-83.
- [7] 涂梦洁. 冲击性负荷无功快速补偿系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- TU Mengjie. Research on reactive load reactive compensation system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [8] 任艳杰, 赵玉林. 低压电网具有无功补偿等功能的综合自动化装置的研究[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(2): 229-231.
- REN Yanjie, ZHAO Yulin. Research on integrated automation device with reactive power compensation and other functions in low voltage grid[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(2): 229-231.
- [9] 董文华. 基于预测模型的无功补偿算法[J]. 山东工业技术, 2018(17): 157-158, 170.
- DONG Wenhua. Reactive power compensation algorithm based on predictive model[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(17): 157-158, 170.
- [10] 周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 68-75.
- ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Dynamic reactive power optimization configuration method considering reducing the risk of transient voltage instability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 68-75.
- [11] 李建科, 王金全, 金伟一, 等. 船舶岸电系统研究综述[J]. 船电技术, 2010, 30(10): 12-15.
- LI Jianke, WANG Jinqun, JIN Weiye, et al. Review of ship shore power system research[J]. Marine Power Technology, 2010, 30(10): 12-15.
- [12] 刘军. 船用岸电变频器的控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- LIU Jun. Research on control of marine shore power converter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [13] 左强. 港口船舶岸电系统技术方案研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- ZUO Qiang. Research on technical scheme of port ship shore power system[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] 田鑫, 赵国亮, 赵波, 等. 船用岸电供电主电气接线方式研究[J]. 电气技术, 2015(1): 56-59.
- TIAN Xin, ZHAO Guoliang, ZHAO Bo, et al. Research on main electrical connection mode of marine shore power supply[J]. Electric Technology, 2015(1): 56-59.
- [15] 苗凤娟. 防治到港船舶污染的岸电技术研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2006.
- MIAO Fengjuan. Research on shore power technology for prevention and control of ship pollution in Hong Kong[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2006.
- [16] 张俊潇, 杨家豪, 耿红杰, 等. 冲击负荷接入对配电网电压质量影响及其无功配置研究[J]. 华北电力技术, 2015(11): 11-17.
- ZHANG Junxiao, YANG Jiahao, GENG Hongjie, et al. Study on the influence of impact load access on distribution network voltage quality and its reactive power configuration[J]. North China Power Technology, 2015(11): 11-17.
- [17] 孟晓芳, 王俊, 王英男, 等. 计及分布式电源局部调压

- 能力的 10 kV 配电网低电压治理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 65-72.
- MENG Xiaofang, WANG Jun, WANG Yingnan, et al. Low voltage control method for 10 kV distribution network considering local voltage regulation of distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 65-72.
- [18] 徐庆华, 李学军, 巩保峰, 等. 220 kV 变电站低压侧电压等级的选择研究[J]. 上海电气技术, 2018, 11(1): 8-10.
- XU Qinghua, LI Xuejun, GONG Baofeng, et al. Study on selection of voltage level on low voltage side of 220 kV substation[J]. Shanghai Electric Technology, 2018, 11(1): 8-10.
- [19] 周平. 磁控电抗器无功补偿技术在电力系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- ZHOU Ping. Application of reactive power compensation technology of magnetron reactor in power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [20] 张永武, 孙爱民, 张源超, 等. 风电场无功补偿容量配置及优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 150-156.
- ZHANG Yongwu, SUN Aimin, ZHANG Yuanchao, et al. Reactive power compensation capacity configuration and optimization operation of wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2011, 23(6): 150-156.
- [21] CHEN Qixin, ZHAO Xiangyu, GAN Dahua, et al. Active-reactive scheduling of active-distribution system considering interactive-load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0050-4.
- [22] 黄震希, 张祥龙, 刘燕华, 等. 基于风电功率变化典型场景的风电场无功补偿优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 51-60.
- HUANG Zhenxi, ZHANG Xianglong, LIU Yanhua, et al. Optimal configuration of reactive power compensation for wind farm based on typical scenes of wind power variation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 51-60.
- [23] 王爽, 高长征. 交流并网海上风电场无功配置原则研究[J]. 东北电力技术, 2016, 37(4): 42-45, 62.
- WANG Shuang, GAO Changzheng. Research on principle of reactive power configuration of AC wind farms[J]. Journal of Northeast Electric Power, 2016, 37(4): 42-45, 62.
- [24] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 78-85. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [25] 胡超. 主动配电网中无功功率全局协调控制策略[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- HU Chao. Global coordinated control strategy for reactive power in active distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [26] 赵亚清, 卢文平, 谢欢, 等. 计及主网不同电压跌落影响的分布式电源特性研究[J]. 华北电力技术, 2014(6): 1-5.
- ZHAO Yaqing, LU Wenping, XIE Huan, et al. Research on distributed power supply characteristics considering different voltage drop effects in main network[J]. North China Power Technology, 2014(6): 1-5.

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-08-21

作者简介:

郭元战(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测; E-mail: 332728860@qq.com

魏云冰(1970—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化、电力设备在线监测与故障诊断等;

李长庆(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测。

(编辑 张爱琴)