

模块化多电平换流阀可靠性研究与设计优化

段 军, 谢晔源, 姜田贵, 朱铭炼, 欧阳有鹏

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:模块化多电平换流阀(modular multi-level converter, MMC)作为统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)系统中的关键设备,其运行的可靠性直接影响到整个系统的安全稳定运行。采用 $k/n(G)$ 可靠性模型描述方法,清晰地描述了换流阀可靠性与各种冗余度之间的关系,定量计算了500 kV 苏南 UPFC 换流阀的可靠性指标,并对换流阀可靠性进行了优化设计,满足500 kV 苏南 UPFC 工程要求,并为 UPFC 换流阀冗余度设计和优化提供了参考依据。

关键词:统一潮流控制器;模块化多电平换流阀;可靠性;冗余性设计; $k/n(G)$

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)02-0038-06

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为目前功能最全面的柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)设备,在潮流控制上具有较大的优势。既可以快速控制输电线路有功和无功潮流,提高线路的输送能力,同时也可以提高系统电压稳定性,改善系统阻尼,提高功角稳定性^[1-2]。目前,世界上电压等级最高、容量最大的江苏苏州南部电网500 kV UPFC 科技示范工程已经正式投运,在世界范围内首次实现500 kV 电网电能流向的灵活、精准控制,最大可提升苏州电网电能消纳能力约1300 MW^[3-5]。

换流阀是基于模块化多电平换流阀的统一潮流控制器(modular multi-level converter based unified power flow controller, MMC-UPFC)的核心设备,组成元件多,结构复杂,研究其可靠性,对于UPFC的可靠性和可用率评估具有重要意义。在直流系统可靠性领域,以往的研究多集中在直流输电系统可靠性评估方法^[6-7]及保护装置等的可靠性分析^[8-9],近年来,模块化多电平换流阀(modular multi-level converter, MMC)的可靠性逐步得到关注,由于缺乏基于MMC的柔性直流系统和UPFC在电力系统中实际运行数据,研究中往往采用假设数据,因此研究成果对实际系统的指导意义有限。文献[10]以StakPak绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT) MMC为例,计算了不同电压等级和不同冗余下的换流阀可靠性指标;文献[11]研究了采用各种不同功率器件时变桥臂多电平拓扑(alternative arm multi-level converter, A2MC)的柔性直

流输电技术(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)的可靠度,以10 kV电压等级为例进行计算分析;文献[12]考虑子模块、控制保护系统、阀冷系统等,构建了MMC在两种备用策略下的可靠度函数。

本文采用 $k/n(G)$ 可靠性模型描述方法,清晰描述了模块化多电平换流阀可靠性与各种冗余度之间的关系,定量计算了500 kV 苏南 UPFC 换流阀的可靠性指标,并对换流阀可靠性进行优化设计,满足实际工程要求,为后续UPFC换流阀冗余度设计提供参考依据。

1 MMC-UPFC 系统结构

1.1 UPFC 主电路结构

500 kV 苏南 UPFC 主回路拓扑结构如图1所示。串、并联侧3个换流阀采用背靠背连接方式,并联侧换流阀一套,通过启动电阻接至并联变压器,再接入木渎500 kV 母线,从系统吸收有功功率稳定直流母线电压,同时可以向系统吸收或注入无功功率;串联侧换流阀两套,通过2个串联变压器接入木渎—梅里500 kV 双回线路,向系统插入相位、幅值可独立调节的电压,从而起到潮流控制的功能。机械旁路开关与串联变压器串联,在串联侧换流阀长时间退出运行时,旁路串联侧所有设备;晶闸管旁路开关在紧急故障情况下旁路串联侧换流阀,起保护作用^[5]。

采用基于全控电力电子器件IGBT构成的模块化多电平电压源型换流阀是MMC-UPFC的核心设备,是交流系统和直流系统的分界点和转换器,其运行的可靠性直接影响到整个UPFC系统的安全稳定运行。

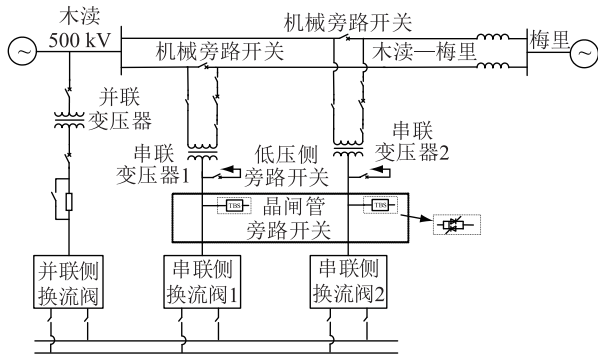


图 1 500 kV 苏南 UPFC 主回路拓扑示意

Fig.1 500 kV Sunan UPFC main circuit topology diagram

1.2 MMC 基本结构

MMC 拓扑结构如图 2 所示,每个换流阀相单元由上、下 2 个桥臂组成,三相共包含 6 个桥臂,每个桥臂由桥臂电抗器和若干相同的子模块 (sub-module, SM) 组成。MMC 子模块可采用全桥、半桥或者类全桥拓扑。500 kV 苏南 UPFC 换流阀子模块采用半桥拓扑,如图 3 所示,每个子模块由 2 个 IGBT、2 个 IGBT 驱动板、电容器、保护晶闸管 SCR、旁路开关 K、高压取能电源以及子模块控制器 (sub-module controller, SMC) 组成。

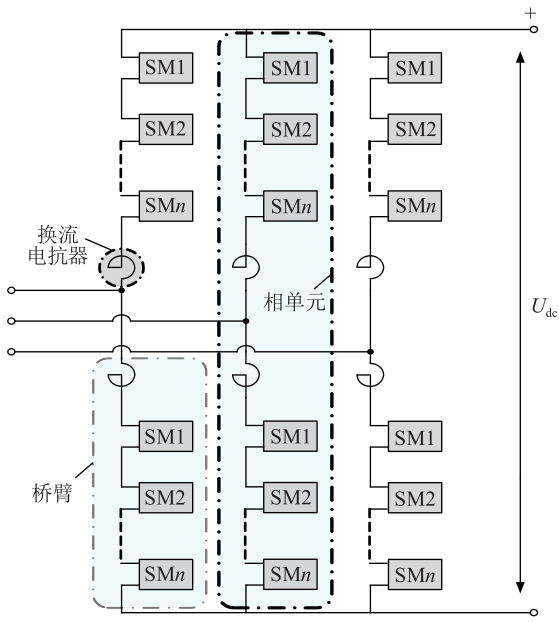


图 2 MMC 拓扑结构

Fig.2 The topology of MMC

2 k/n(G) 系统可靠性模型

假定系统由 n 个相互独立且服从相同寿命分布的元件组成, $k/n(G)$ 系统也叫 n 中取 k 的冗余表决系统^[13-16]。是指当 n 个元件中至少有 k 个元件正

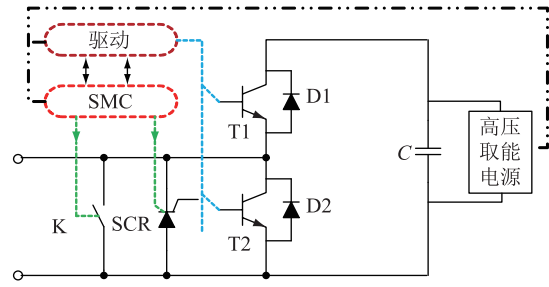


图 3 半桥子模块拓扑

Fig.3 The topology of half bridge module

常工作时,即失效的元件数小于等于 $n-k$ 时,系统正常工作,反之则系统失效。

若每个元件的可靠度为 p ,不可靠度为 q ,则 $p+q=1$,所以 $k/n(G)$ 系统的可靠度为:

$$R(k, n) = \sum_{j=k}^n C_n^j p^j q^{n-j} \quad (1)$$

若各元器件的寿命服从指数分布,故障率为 λ ,则系统的可靠度为:

$$R(k, n) = \sum_{j=k}^n C_n^j e^{-j\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{n-j} \quad (2)$$

系统的平均无故障工作时间为:

$$T_{MTTF} = \int_0^{+\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=k}^n \frac{1}{j} \quad (3)$$

3 UPFC 换流阀可靠性模型

3.1 子模块可靠模型

子模块的晶闸管和旁路开关仅在系统或子模块发生故障时投入工作,因此 MMC 子模块可靠性主要由 IGBT、电容器、IGBT 驱动电路、SMC 和高压取能电源共同决定。组成子模块的各个元器件可以看成可靠性串联系统,任一元件失效,子模块故障,并合闸旁路开关,退出运行。子模块可靠性框图如图 4 所示。



图 4 子模块可靠性框图

Fig.4 Reliability block diagram of sub-module

文中假设子模块各元件处于寿命曲线中的稳定运行期,即其寿命服从指数分布,则在时刻 t ,元件的可靠度为:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

根据图 4 所示框图,子模块可靠度为:

$$R_{SM}(t) = [R_{IGBT}(t)]^2 + R_{cap}(t) + [R_{dri}(t)]^2 + R_{SMC}(t) + R_{Power}(t) \quad (5)$$

式中: $R_{IGBT}(t)$, $R_{cap}(t)$, $R_{dri}(t)$, $R_{SMC}(t)$ 和 $R_{Power}(t)$ 分别为 IGBT 可靠度、电容器可靠度、IGBT 驱动可靠

度、SMC 可靠度和高压取能电源可靠度。由各元件故障率代入式(4)计算得到。

由于组成子模块的各个元件寿命均服从指数分布,由式(5)可知子模块寿命也服从指数分布,且其故障率为:

$$\lambda_{sm} = 2\lambda_{IGBT} + \lambda_{cap} + 2\lambda_{dri} + \lambda_{SMC} + \lambda_{Power} \quad (6)$$

式中: λ_{IGBT} , λ_{cap} , λ_{dri} , λ_{SMC} , λ_{Power} 分别为 IGBT 失效率、电容器失效率、IGBT 驱动失效率、SMC 失效率和高压取能电源失效率。

若换流阀子模块采用如全桥、类全桥等其他拓扑,可以根据子模块的组成元件类别和数量,建立可靠性框图,按照上述步骤推导其故障率模型。

3.2 桥臂可靠性模型

MMC 桥臂由若干子模块组成,每个桥臂含一定数量的冗余模块,正常运行时,冗余模块同其他模块一样投入运行;任一子模块出现故障,则通过旁路开关将其旁路,此故障模块退出运行,待下次检修时更换;当故障模块数量超过冗余模块个数时,换流阀桥臂故障,产生跳闸信号。

因此 MMC 换流桥臂的可靠性模型非常适合用 $k/n(G)$ 系统模型来描述。 $k/n(G)$ 系统指由 n 个部件组成的系统,当 k 个或 k 个以上部件正常工作时,系统正常工作;当 $n-k+1$ 个部件故障时,系统故障;在系统故障期间, $k-1$ 个正常的部件停止工作,不再发生故障,直到正在修理的部件修理完成, k 个正常的部件同时进入工作状态,此时系统才重新进入工作状态^[8]。换流阀桥臂可靠性框图如图 5 所示。

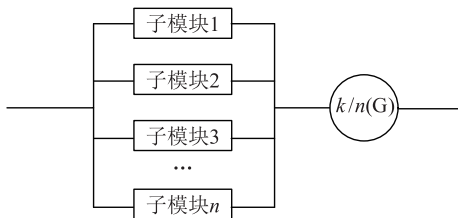


图 5 桥臂可靠性框图

Fig.5 Block diagram of phase arm reliability

为简化分析,文中假设桥臂中所有子模块相互独立且服从相同的寿命分布,即为独立同分布元件。每个子模块的可靠度均为 $R_{SM}(t)$,则子模块的不可靠度为 $1 - R_{SM}(t)$,根据式(2)可得到桥臂的可靠度为:

$$R_{ARM}(t) = \sum_{j=k}^n C_n^j [R_{SM}(t)]^j [1 - R_{SM}(t)]^{(n-j)} \quad (7)$$

式中: n 为桥臂中子模块总数; k 为不含冗余的桥臂模块数量。

3.3 换流阀可靠性模型

MMC 包括 6 个桥臂,正常运行时,6 个桥臂均为正常工作状态,任一个桥臂故障,换流阀进入故障跳闸状态,则整个换流阀的可靠度为 6 个 $k/n(G)$ 桥臂构成的可靠性串联系统,换流阀可靠度框图如图 6 所示。

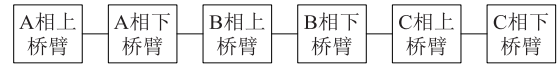


图 6 MMC 换流阀可靠性框图

Fig.6 Block diagram of MMC reliability

则换流阀的可靠度为:

$$R_{valve}(t) = [R_{ARM}(t)]^6 \quad (8)$$

将式(6)和式(7)带入式(8)得:

$$R_{valve}(t) = [R_{ARM}(t)]^6 =$$

$$\left\{ \sum_{j=k}^n C_n^j [R_{SM}(t)]^j [1 - R_{SM}(t)]^{(n-j)} \right\}^6 =$$

$$\left\{ \sum_{j=k}^n C_n^j (e^{-\lambda_{sm}t})^j [(1 - e^{-\lambda_{sm}t})]^{(n-j)} \right\}^6 \quad (9)$$

换流阀的平均无故障时间:

$$T_{MTTF} = \int_0^{+\infty} R_{valve}(t) dt = \frac{1}{\lambda_{sm}} \sum_{j=k}^n \frac{1}{j} \quad (10)$$

4 苏南 UPFC 换流阀可靠性分析及优化

4.1 苏南 UPFC 换流阀可靠性分析

本文以 500 kV 苏南 UPFC 换流阀为例,对模块化多电平换流阀可靠性进行分析及优化。500 kV 苏南 UPFC 工程有 3 个背靠背换流阀,换流阀额定直流电压 ± 90 kV,额定容量为 $250 \text{ MV} \cdot \text{A}$,UPFC 换流阀子模块额定直流电压为 1.6 kV,则每个桥臂不含冗余的子模块个数 k 约为 112 个。

子模块各元器件的故障率见表 1。失效率 λ 通常以 FIT 表示,1FIT 定义为 $10^{-9}/\text{h}$ 。将元器件故障率代入式(6)可得子模块故障率为 8.76×10^{-3} 次/a。

表 1 子模块元器件故障率

Tab.1 Failure rate of sub-module component

| 元器件 | FIT 率 | 故障率/(次·a ⁻¹) | 数据来源 |
|-----------|-------|--------------------------|--------|
| IGBT×2 | 100 | 8.76×10^{-4} | 文献[16] |
| 电容 | 200 | 1.752×10^{-3} | 文献[16] |
| IGBT 驱动×2 | 200 | 1.752×10^{-3} | 工程经验 |
| 辅助供电电源 | 200 | 1.752×10^{-3} | 工程经验 |
| SMC | 300 | 2.628×10^{-3} | 工程经验 |

本文考虑 500 kV 苏南 UPFC 换流阀桥臂子模块总数分别为 112,117,120,123 个时,即冗余度分别为 0%,5%,8%,10%的情况下,将参数代入式(9)绘制换流阀可靠度如图 7 所示。

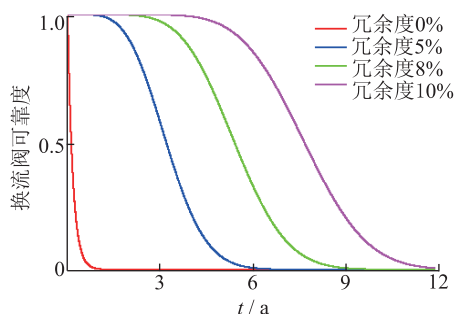


图7 不同冗余度下换流阀可靠度曲线
Fig.7 Reliability curve of MMC valve with different redundancy

从图7可以看出,在子模块故障率一定的情况下,随着换流阀模块总数增加,即冗余度增加,换流阀可靠度增加。从图8可以看出,同样的冗余度增量情况下,在产品的使用前期,可靠度增加明显,而在产品的使用后期,冗余度增加对换流阀可靠度增加效果趋于减少;同样使用年限下,增加冗余度,换流阀可靠度增量趋于减少,单位投资所取得的可靠性提高的效益逐步降低。因此,在子模块故障率一定的情况下,当 k 确定后,需要进行优化设计,选取 n 的值,确保取得较好的可靠性和经济性。

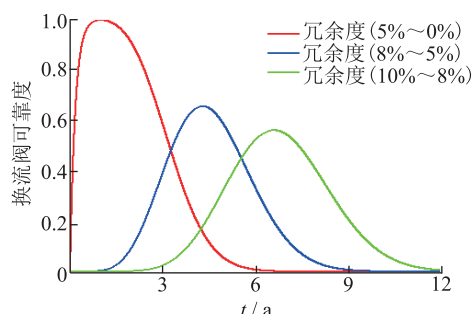


图8 不同冗余度增量下换流阀可靠度曲线
Fig.8 Reliability curve of MMC valve with different redundancy increment

4.2 苏南UPFC换流阀可靠性优化

根据式(2) $k/n(G)$ 系统的可靠度计算公式:

$$R(k, n) - R(k, n - 1) = \binom{n-1}{k-1} (e^{-\lambda t})^k (1 - e^{-\lambda t})^{n-k} \quad (11)$$

则平均无故障工作时间MTTF指标为:

$$T_{\text{MTTF}}(k, n) - T_{\text{MTTF}}(k, n - 1) = \frac{1}{n\lambda} \quad (12)$$

显然, λ 减小, n 增大,系统可靠性提高;反之则系统可靠性降低。 λ 参数是由器件本身的物理特性决定;而 n 的变化,可通过拓扑结构设计来改变。

文中通过设定换流阀预期可靠性目标,比较可靠寿命,优化设计桥臂子模块数量 n ,并给出苏南UPFC换流阀可靠性设计和优化指导性原则。可靠

寿命是指在可靠度等于给定值 r 时,系统的寿命记作 $t(r)$,即 $R[t(r)] = r$ 。主要从以下方面讨论:

首先,确定UPFC换流阀满足可靠度要求的桥臂子模块数量。实际运行中,换流阀子模块是可修复元件,在两次换流阀维护期间,子模块做不可修复元件处理。

UPFC换流阀可靠性设计目标:2 a内,换流阀可靠度在0.999以上。表2为不同冗余度,苏南UPFC换流阀 $t(0.999)$ 可靠寿命。由表可知,冗余度为10%,即模块数量配置为123个时,苏南UPFC换流阀 $t(0.999) = 3.19$ a,大于2 a,满足设计要求。

其次,以UPFC换流阀达到常规输变电设施同等可靠性水平作为预期目标来分析。根据国家能源局和中国电力企业联合发布的2015年全国电力可靠性指标第四部分输变电设备^[17],“十二·五”期间我国550 kV输变电设备故障率如表3所示。

对比表2和表3可知,使用可靠寿命 $t(0.999)$ 指标,UPFC换流阀采用112/120(G)系统时,其可靠寿命指标优于500 kV变压器、断路器和架空线。

表2 换流阀的可靠寿命指标

Tab.2 Reliable lifetime indices of MMC valve

| k/n | 冗余度 | $t(0.999)/a$ |
|---------|------|--------------|
| 112/112 | 1 | 0.001 |
| 112/117 | 1.05 | 0.76 |
| 112/120 | 1.08 | 1.86 |
| 112/123 | 1.1 | 3.19 |

表3 500 kV主要输变电设施故障率统计指标

Tab.3 Failure rates of 500 kV transmission equipment

| 分类 | 故障率 $\times 10^{-3}/[\text{次}\cdot(\text{台}\cdot\text{a})^{-1}]$ | $t(0.999)/a$ |
|------|--|--------------|
| 变压器 | 1.9 | 0.50 |
| 断路器 | 1.88 | 0.504 |
| 架空线* | 1.002 | 1.002 |

*注:架空线故障率单位为次/($\text{km}\cdot\text{a}$)。

综上所述,500 kV苏南UPFC换流阀桥臂采用112/123(G)结构时,可靠性能满足工程需求,且优于同电压等级输电设施的可靠性。

5 结语

本文针对500 kV苏南UPFC换流阀,从概率模型的角度,对其可靠性进行了深入的分析。采用 $k/n(G)$ 可靠性模型描述方法,清晰描述了换流阀可靠性与各种冗余度之间的关系,采用工程经验和文献参考子模块故障率参数,定量计算了苏南UPFC换流阀可靠性指标,优化换流阀可靠性设计,满足实际工程需求,为后续UPFC换流阀冗余度设计和优化提供参考依据。

参考文献:

- [1] 朱鹏程,刘黎明,刘小元,等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):45-51.
ZHU Pengcheng, LIU Liming, LIU Xiaoyuan, et al. Analysis and study on control strategy for UPFC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(1):45-51.
- [2] 王莹,甄宏宁,常宝立,等. UPFC在南京西环网中的应用需求分析[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):53-56.
WANG Ying, ZHEN Hongning, CHANG Baoli, et al. Research on the application of UPFC in Nanjing western grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016,35(1):53-56.
- [3] 凌峰,秦健,戴阳,等. 南京UPFC工程运行方式[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):36-40.
LING Feng, QIN Jian, DAI Yang, et al. The operation modes for Nanjing UPFC project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(6):36-40.
- [4] 李鹏,林金娇,孔祥平,等. 统一潮流控制器在500 kV苏南电网中的应用[J]. 电力工程技术,2017,36(1):20-24.
LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping, et al. Application of UPFC in the 500 kV southern power grid of Suzhou [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017,36(1):20-24.
- [5] 张军,吴金龙,梁云丹,等. 南京UPFC工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):1-4.
ZHANG Jun, WU Jinlong, LIANG Yundan, et al. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(6):1-4.
- [6] 胡博,谢开贵,黎小林,等. HVDC输电系统可靠性跟踪方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):29-35.
HU Bo, XIE Kaigui, LI Xiaolin, et al. Techniques of tracing the unreliability contributions of HVDC transmission system components [J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(10):29-35.
- [7] 谢开贵,王立斌,刘映尚,等. 高压直流输电系统最优设备选型模型和算法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):16-21.
XIE Kaigui, WANG Libin, LIU Yingshang, et al. Optimal model and its algorithm for determining the components type in HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(4):16-21.
- [8] 李延龙,杨亚璞,李楠. 高压直流输电控制保护系统的冗余可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(16):59-62.
LI Yanlong, YANG Yapu, LI Nan. Reliability research for HVDC transmission control and protection system redundancy [J]. Power System Protection and Control, 2009,37(16):59-62.
- [9] 刘耀,王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术,2008,32(5):51-54.
LIU Yao, WANG Mingxin. Reliability analysis on redundant configuration of protective relays for HVDC power transmission system [J]. Power System Technology, 2008,32(5):51-54.
- [10] 朱晋,韦统振,霍群海. A2MC VSC-HVDC系统可靠性分析
- 与冗余度优化研究[J]. 电工技术学报,2013,28(S2):319-323.
ZHU Jin, WEI Tongzhen, HUO Qunha. Reliability model analysis and redundancy design of A2MC VSC-HVDC power transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,28(S2):319-323.
- [11] 丁明,王京景,宋倩. 基于 $k/n(G)$ 模型的柔性直流输电系统换流阀可靠性建模与冗余性分析[J]. 电网技术,2008,32(21):32-36.
DING Ming, WANG Jingjing, SONG Qian. Reliability modeling and redundancy analysis of converter valves for VSC-HVDC power transmission system based on k -out-of- n : G Model [J]. Power System Technology, 2008,32(21):32-36.
- [12] 王秀丽,郭静丽,庞辉,等. 模块化多电平换流器的结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1908-1914.
WANG Xiuli, GUO Jingli, PANG Hui, et al. Structural reliability analysis of modular multi-level converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(7):1908-1914.
- [13] RUIZ V D, MESSINA A R, PAVELLA M. Online assessment and control of transient oscillations damping [J]. Power Systems IEEE Transactions on, 2004,19(2):1038-1047.
- [14] 郭春林,童陆园. 基于在线辨识的可控串补自适应控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):7-12.
GUO Chunlin, TONG Luyuan. Self-tuning phase-compensation control based on online identification of TCSC [J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(7):7-12.
- [15] 孟洁,李世明,温伯坚. 基于希尔伯特振动分解的低频振荡在线辨识[J]. 广东电力,2016,29(8):71-78.
MENG Jie, LI Shiming, WEN Bojian. Online identification for low frequency oscillation based on Hilbert vibration decomposition [J]. Guangdong Electric Power, 2016,29(8):71-78.
- [16] GRINBERG R, RIEDEL G, KORN A, et al. On reliability of medium voltage multilevel converters [C] // Proceedings of 5th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver: IEEE, 2013:4047-4052.
- [17] 电监会可靠性管理中心. 2015年全国电力可靠性指标[R]. 北京:电监会可靠性管理中心,2016.
SERC Reliability Management Center. 2015 National power reliability index [R]. Beijing: SERC Reliability Management Center, 2016.

作者简介:



段军

段军(1986—),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术相关工作(E-mail:duanj@nrec.com);

谢晔源(1978—),男,硕士,高级工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术相关工作;

姜田贵(1984—),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术相关工作。

Reliability Research and Design Optimization of Modular Multilevel Converter

DUAN Jun , XIE Yeyuan , JIANG Tianguai , ZHU Minglian , OUYANG Youpeng
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: As the key equipment of UPFC, the reliability of the modular multilevel voltage sourced converter operation directly affects the safe and stable operation of the whole AC system. An k -out-of- n ; G system model of Sunan 500 kV UPFC-MMC and the basic analysis method for it are proposed in this paper. The relation between the reliability of valve and different redundancies is clearly described. The reliability value and MTTF of Sunan 500 kV UPFC-MMC are evaluated. And the optimal amount of redundant sub-module is analyzed basing on the indices obtained in forenamed study. The reliability design optimization of MMC valve could meet the engineering requirements Sunan 500 kV UPFC and would provide a reference for follow-up project.

Key words: UPFC; modular multilevel converter; reliability; reliability design optimization; k -out-of- n ; G system

(编辑 方 晶)

(上接第 19 页)

Comparison and Selection of MV Distribution Network Planning Schemes Considering Reliability Assessment

YANG Wenli

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: From two aspects of the collection and calculation methods of reliability parameters and the selection of planning schemes, a formation and selection method of MV distribution network planning schemes considering reliability assessment is proposed in this paper, and the application of the guidance on the reliability evaluation of MV distribution network is furtherly enriched. This method includes parameter collection, reliability evaluation algorithm and formulation and comparison of schemes. Cooperating reliability and economy, the incremental net benefit model of investment is proposed based on "with&without comparison evaluation method", and the difference between the simplified model and the scheme comparison method based on life cycle cost minimization is analyzed under different power supply capacity and load demand. The investment cost & benefit is analyzed based on dynamic economic indicators, such as net present value and net present value rate, which can be used for multiple options. The case shows that the proposed method is feasible and effective.

Key words: MV distribution network; reliability assessment; with&without comparison evaluation method; life cycle cost; comparison and selection

(编辑 陈 娜)

(上接第 32 页)

Research on the Effect of 500 kV UPFC in Southern Suzhou on Distance Protection and the Countermeasures

QU Feng¹, DENG Kai¹, ZHANG Yun¹, QIAN Wei¹, ZHOU Qiang¹, KONG Xiangping²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch, Nanjing 210002, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: It is conducive to improve the power supply capacity of power grid in the southern part of Suzhou based on unified power flow Controller (UPFC). However, the integration of UPFC has an impact on the reliability, selectivity and sensitivity of transmission line protection. In this paper, the fault equivalent model of 500 kV UPFC in Southern Suzhou is built combined with the control and protection logic after line fault, then the influence on distance protection action is analyzed, as well as the coping strategies are proposed.

Key words: UPFC in Southern Suzhou; distance protection; fault equivalent model; coping strategies

(编辑 方 晶)