

[开关设备]

海上集成变电站配套用环保型开关设备研究

文/许继电气股份有限公司 王洋洋

许继集团有限公司 武兴坛 孙鹏程 王其中 喻会永 赵玉芝

海上集成变电站中的开关设备是变电站的核心设备之一。由于海上环境的特殊性，其应具有占地面积小、环保无污染等优点。通过对N₂绝缘介质的理论分析和试验研究，解决了现有充气柜环境污染问题。

柜式气体绝缘开关设备（简称C-GIS充气柜），是近十几年来国外新发展起来的高新技术系列产品，逐渐成为金属封闭开关设备的一个重要品种。近年来，气体绝缘开关设备在各个领域迅速地推广与应用。随着我国海上风电的发展，作为海上集成变电站核心设备之一的开关设备，气体绝缘开关设备在新能源领域的需求越来越强烈。

现有的气体绝缘开关设备大多采用SF₆气体作为绝缘介质。但是SF₆气体会产生严重的温升效应，在电弧作用下容易分解出有毒气体，而且SF₆气体容易液化，价格比较高。不适合用于海上集成变电站，所以一种环保型开关设备的研究迫在眉睫。

研究内容

N₂绝缘介质下的电场击穿特性研究。通过对电场仿真及试验相结合的方式，全面掌握不同电场结构下N₂绝缘介质的电场击穿特性。试验方法如下。

1) 通过有限元电场仿真，从理论上分析在平板电极、同轴圆柱电极、棒-棒电极及球-球电极等不同电场结构、不同压力下的N₂绝缘介质的电场击穿特性，并从中找出最佳的电极形状结构。

2) 依据电场仿真得出的结果，试制样品，通过试验来验证在N₂绝缘介质下该形状结构电极的电场击穿特性。

理论分析

1. 纯N₂在均匀电场下的工频耐电强度

经过大量的试验研究及实践，可得出纯N₂在均匀电场下的工频耐电强度的经验公式

$$E_{N_2} = E_{SF_6} / (2.5 \sim 3) \\ = (65 \times 10p \times 0.73/1.414) / (2.5 \sim 3)$$

式中， E_{SF_6} 表示SF₆气体在均匀电场下的工频耐电强度，单位为kV/cm； p 表示气体绝对压力，取值为0.10、0.11、0.12……0.50。

根据式（1），可以计算出纯N₂在不同气体压力下（均匀电场下）的工频耐电强度数据，如图1所示。

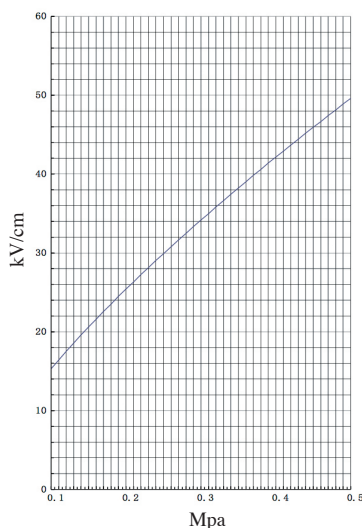


图1 纯N₂在均匀电场下的工频耐电强度曲线图

2. 纯N₂在均匀电场下的冲击耐电强度

经过大量的试验研究及实践, 可得出纯N₂在均匀电场下的冲击耐电强度

$$E_{N_2} = E_{SF_6} / (2.5 \sim 3) = 68 \times 10p \times 0.73 / (2.5 \sim 3)$$

式中, E_{SF_6} 表示SF₆气体在均匀电场下的冲击耐电强度, 单位为kV/cm; p 表示气体绝对压力, 取值为0.10、0.11、0.12……0.50。

根据式(2), 可以计算出纯N₂在不同气体压力下(均匀电场下)的冲击耐电强度数据, 如图2所示。

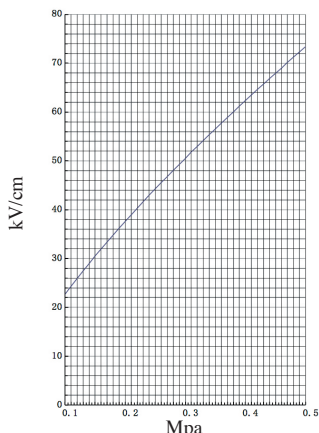


图2 纯N₂在不同气体压力下(均匀电场下)的冲击耐电强度曲线表

3. 纯N₂在不同电场下的工频击穿电压

纯N₂在不同电场下的工频击穿电压

$$U = \eta E_{SF_6} (2.5 \sim 3) d \\ = (65 \times 10p \times 0.73 \eta / 1.414) / (2.5 \sim 3) d$$

式中, E_{SF_6} 表示SF₆气体在均匀电场下的工频耐电强度; p 表示气体绝对压力; d 表示间隙距离; η 表示绝缘利用系数, 均匀电场情况下取值0.9~1.0, 稍不均匀电场情况下取值0.72~0.88, 不均匀电场情况下取值0.55~0.65, 极不均匀电场情况下取值0.39~0.49。

根据式(3), 可以计算出纯N₂在不同电场下的工频击穿电压, 如图3所示。

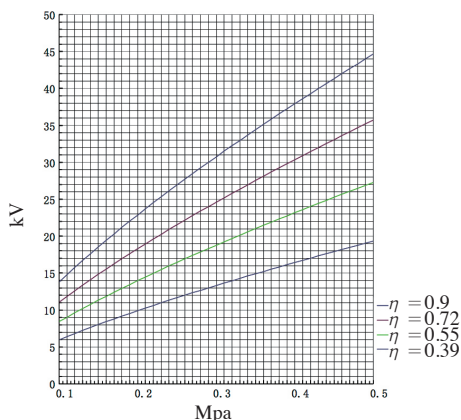


图3 纯N₂不同电场下的工频击穿电压曲线图

4. 纯N₂在不同电场下的冲击击穿电压

纯N₂在不同电场下的冲击击穿电压

$$U = \eta E_{SF_6} / (2.5 \sim 3) d \\ = (68 \times 10p \times 0.73 \eta / 1.414) / (2.5 \sim 3) d$$

式中, E_{SF_6} 表示SF₆气体在均匀电场下的冲击耐电强度; p 表示气体绝对压力; d 表示间隙距离; η 表示绝缘利用系数, 均匀电场情况下取值0.95~1.0, 稍不均匀电场情况下取值0.84~0.95, 不均匀电场情况下取值0.7~0.8, 极不均匀电场情况下取值0.52~0.65。

根据式(4), 可以计算出纯N₂不同电场下的冲击击穿电压数据, 如图4所示。

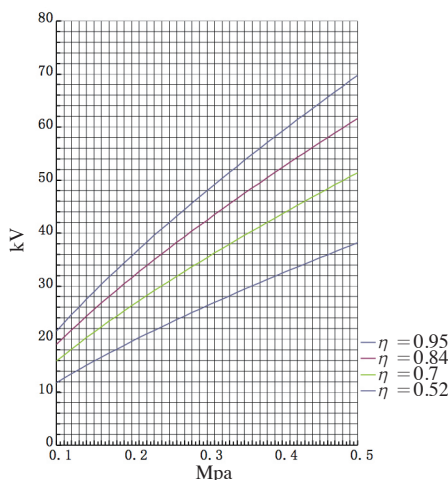


图4 纯N₂不同电场下的冲击击穿电压曲线图

试验验证

在实际运用中, 不同的电场结构对N₂绝缘介质的击穿电压值影响非常大, 因此通过试验来研究N₂绝缘介质在不同的电场结构下的工频击穿特性是非常有必要的, 对设计海上集成变电站配套用环保型气体绝缘开关设备具有重要的指导意义。其试验方法如下。

试验设备何接线图如图5所示。安装时保证两电极间距离 d 等于10 mm, 并分别在0.1 MPa、0.15 MPa、0.2 MPa、0.25 MPa、0.3 MPa、0.35 MPa、0.4 MPa、0.45 MPa、0.5 MPa等9种不同的气体绝对压力下试验。当工频试验电压值升高到大约70%, 预计达到N₂绝缘介质击穿电压后, 再按照4 kV/s的速率缓慢上升, 直至击穿N₂绝缘介质。通过改变电极形状, 来模拟不同电场结构下N₂绝缘介质的击穿电压值, 分别进行均匀电场、不均匀电场以和极不均匀电场3种不同电场结构下的工频击穿试验。每种电场结构进行3次试验, 试验数据取3次试验结果的平均值。

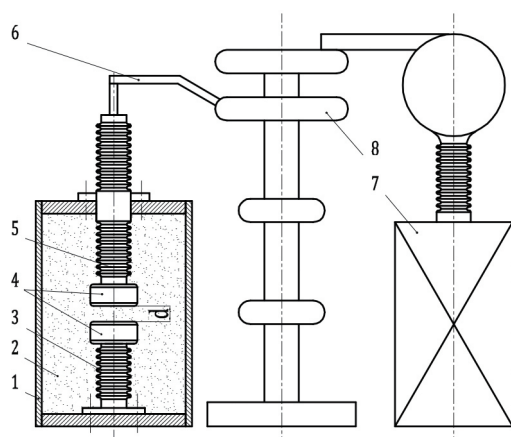


图5 试验设备及其接线简图

1—气箱壳体 2—绝缘气体 3—绝缘子
4—电极 5—绝缘套管 6—导电棒
7—工频试验变压器 8—电容分压器

平板电极、同轴圆柱电极和球—球电极的电场不均匀系数 f 为1.0~1.1,属均匀电场;同心球电极和球—板电极电场不均匀系数 f 为1.2~1.8,属不均匀电场;棒—板电极电场不均匀系数 f 大于4,属极不均匀电场。纯 N_2 的工频击穿特性如图6所示。

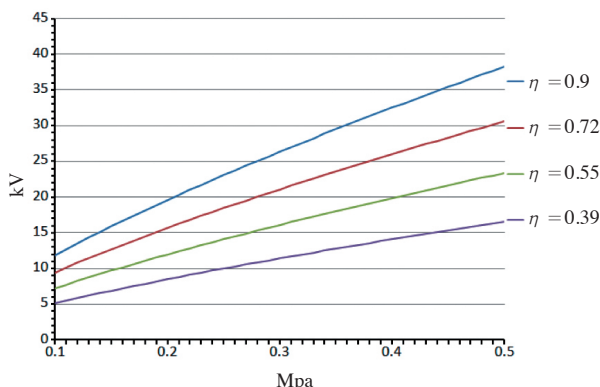


图6 纯 N_2 在不同电场下的工频击穿电压

从曲线中可以看出,随着纯 N_2 气体绝对压力的增高,其相应的工频击穿电压也随之升高,并呈现近似的线性关系。同时,从曲线中还可以看出,电场不均匀系数 f 对 N_2 气体的击穿电压值的影响很大。

通过对 N_2 绝缘介质进行的理论仿真分析,以及通过大量的现场试验验证,本研究主要通过改善电场结构,按照均匀电场或稍不均匀电场设计,避免出现极不均匀电场的情况来解决纯 N_2 绝缘下的绝缘问题。主要方法有以下四点。

1) 主母线套管由传统内侧栽钉固定技术改成气室外侧固定技术。传统的 SF_6 开关技术,其主母

线套管通过气室内部栽钉的方式进行固定,因螺钉形状的不规则性,导致此处电场较集中,影响绝缘性能。本研究的主母线套管设计气室外侧固定技术,气室内部没有螺钉,电场分布均匀,即使在100% N_2 绝缘介质条件下也能满足绝缘要求,该方案已经得到了试验验证。

2) 双排母线技术。主回路设计双排矩形母线结构,在满足相同载流量的情况下,与传统的单母线结构方案相比,电场结构分布更均匀。同时每个“面—面”交汇处均采用大圆弧过渡设计,进一步改善电场。

3) 四段圆弧构造的三工位开关电极技术。三工位开关电极截面采用四段圆弧构成,在相同的长宽高情况下,其电场结构明显优于圆形结构电极和方形结构电极,其绝缘性能能够提升10%左右。

4) 所有紧固件均采用“沉头”设计。气室内部各高压带电体的连接均采用“沉头”设计,即螺栓、螺母均暗藏在导体内部,不会对电场分布的影响。

结束语

随着能源结构的调整,海上风电将成为新能源领域的重点发展方向。开关设备的环保性是海上集成变电站发展的必然趋势。

我公司的环境友好型交流金属封闭气体绝缘开关设备具有如下特点。

1) 采用纯 N_2 气体绝缘技术方案,解决了传统 SF_6 开关设备的环境污染问题,

2) 采用模块化弹簧操动机构技术及双信号控制的三工位开关技术,三公位开关可靠性高、寿命长且稳定性好。

3) 母线套管外侧固定方案,使得母线套管的安装更换简单方便、绝缘性能更好,通过其实现的自调节距离误差的母线插接技术,使现场并柜安装简单、快捷,现场不需气体作业即可完成设备拼接,不受现场施工环境条件、人员技能、充放气设备及密封工艺等因素的影响。

4) 年泄漏率小于0.1%的高性能密封技术、长寿命开关技术及防腐技术,使产品在30年生命周期内实现少维护,有效降低日常维护量,降低维护成本。EA

(收稿日期:2016.10.30)

(编辑:刘群点)