

并联电抗器在高压电网中的应用

张亮

许继变压器有限公司, 河南 许昌 461000

[摘要] 并联电抗器作为一种重要的电力设备, 在高压电网中具有广泛的应用, 文中将从并联电抗器的基本原理开始, 探讨并联电抗器在高压电网中的应用, 包括降低工频过电压和操作过电压、防止发电机带空载线路的自励磁过电压及提升单相重合闸成功率等, 还将讨论中压并联电抗器在高压电网应用中常见问题及解决措施, 通过文中的阐述, 读者将能够全面了解并联电抗器在高压电网中的应用及其未来发展趋势。

[关键词] 并联电抗器; 高压电网; 电压稳定性

DOI: 10.33142/hst.v6i5.9515

中图分类号: TM63

文献标识码: A

Application of Shunt Reactor in High Voltage Power Grid

ZHANG Liang

Xuji Transformer Co., Ltd., Xuchang, He'nan, 461000, China

Abstract: Shunt reactors, as an important power equipment, have a wide range of applications in high-voltage power grids. Starting from the basic principle of parallel reactors, this article will explore the application of parallel reactors in high-voltage power grids, including reducing power frequency overvoltage and operating overvoltage, preventing self-excitation overvoltage of generator with no-load lines, and improving the success rate of single-phase reclosure. Common problems and solutions of medium voltage parallel reactors in high-voltage power grid applications will also be discussed. Through the explanation in the article, readers will be able to comprehensively understand the application and future development trends of parallel reactors in high-voltage power grids.

Keywords: shunt reactor; high-voltage power grid; voltage stability

引言

随着国家提出的“碳达峰、碳中和”的战略目标, 电力作为清洁能源, 需求不断增加, 高压电网的规模和复杂性也在迅速扩大, 高压电网的稳定运行对于保障电力供应的可靠性和稳定性至关重要, 而并联电抗器作为一种重要的电力设备, 它的基本原理是通过电网引入电感元件, 来降低线路末端因容性负载抬高的电压, 降低输电线路末端的工频过电压幅值, 并进一步降低操作过电压, 保护电力设备的正常运行。在本文中, 我们将讨论并联电抗器的基本原理, 并探讨它在电力系统中的应用。

1 并联电抗器的基本结构及用途

并联电抗器是一种在电力系统中常用的电气装置, 主要用于补偿高压线路对地的充电功率, 并联电抗器的按照结构分为干式空心电抗器和铁芯电抗器, 其中铁芯电抗器又分为干式和油浸结构。

干式空心电抗器由多层线圈并联绕制而成, 空气作为磁路, 一般在 110-750kV 的变电站户外使用, 接在主变第 3 绕组出线上, 电压等级为 10-66kV, 单相容量 3000-40000kvar。优点: 造价低、结构简单、重量轻、便于运输和安装、噪音低, 无渗油问题、维护方便、无铁芯饱和等, 缺点: 故障率较高。

干式铁芯并联电抗器为铁芯结构, 铁芯作为 3 相闭合磁路, 一般为 3 相 3 柱式, 电压等级为 10-35kV, 接在主

变第 2 或第 3 绕组出线上, 3 相总容量范围较广, 一般在 100-12000kvar, 主要用于 110-330kV 的变电站户内和轨道交通的变电站及铁路沿线使用, 优点: 体积小, 占用空间少, 维护方便, 缺点: 造价较高。

油浸铁芯并联电抗器也为铁芯结构, 带有壳体内部充油, 一般在 110-1000kV 的变电站户外使用, 适用范围较广, 一般 10-66kV 电压等级容量为 3000-20000kvar, 220kV 以上的高压油抗可以达到单相几十 Mvar 及以上, 优点: 运行稳定, 补偿容量大。缺点: 维护成本高, 造价高。

2 并联电抗器在高压电网中的应用

2.1 降低工频暂态过电压

2.1.1 工频暂态过电压的危害

(1) 工频暂态过电压是操作过电压的强制分量。它的幅值愈高, 对应的操作过电压也愈高, 当操作过电压过高可能会引起绝缘子闪络或设备内部绝缘击穿, 影响设备和输电线路安全运行。(2) 工频暂态电压决定了避雷器的灭弧电压或额定电压, 因而影响避雷器的工作条件和保护效果, 若工频过电压较高, 在选用 MOA 时, 相对地的持续运行电压要避开线路或设备的最高运行相电压, 势必会抬高避雷器的额定电压参数, 这样会降低避雷器的保护效果, 影响电气设备和配电装置的绝缘水平。(3) 工频暂态过电压会提高断路器开断时的恢复电压, 恶化开断条件。(4) 工频暂态过电压持续时间较长, 对电气设备绝缘及运行性

能有影响。例如：油纸绝缘内部游离，污秽绝缘子闪络，铁芯过热、振动及其噪声，电晕及其干扰等。

2.1.2 产生工频过电压的原因

(1) 高压空载长线路的“容升效应”。高压空载或轻载线路对地电容值较大，线路形成容性电流，在流经感性原件的输电线路时，将线路电压逐渐抬高，输电线路末端时，电压达到最高，如下输电线路的 π 型等效电路所示，当负荷端 I3 电流基本为零时，流经线路的电流为对地充电电容电流，电源首端电压 $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + RI_2 + jXI_2$ ，以线路电流为基准，画出向量图，又因高压输电线路的直流电阻 $R < \text{感抗 } X$ ，可知首端电压 U_1 在幅值上小于 U_2 ，这就造成了输电末端电压的抬高。

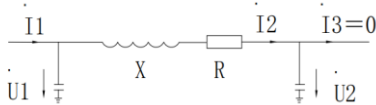


图1 输电线路 π 型等值电路

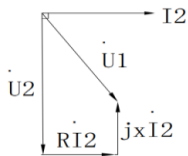


图2 向量图

(2) 系统接地故障引起的工频过电压，在经消弧线圈、电阻器、小电抗等接地时，由于系统零序电流分量流经中性点，使得中性点电压升高，非故障相对地电压也会随之抬高，引起线路或设备的相对地、相间工频过电压。

(3) 发电机突然甩负荷引起的工频电压升高。甩负荷效应：当输电线路负荷运行时，由于某种原因（如发生短路故障）线路末端断路器跳闸，突然切除负荷，因发电机电势不能突变，输送容量越大、功率因数角越小发电机的暂态电势 E' 就会越大，发电机还会因突然甩负荷导致转速增加，电网频率升高。运行经验表明，若系统发生单相接地，继电保护动作使线路突然甩负荷，考虑到线路的电容效应，则工频过电压可达 2 倍的相电压。

2.1.3 并联电抗器降低工频过电压

并联电抗器在高压电网中的一个重要应用是降低工频电压升高数值。在电力系统中，由于负载变化和线路的容性充电功率影响，会导致系统末端电压的升高。在线路的适当位置安装中压或高压并联电抗器，通过自身电感特性来吸收电网多余的容性无功功率，以减少发电机充电功率、削弱线路电容效应。补偿度一般为 60%~80%，可以有效地降低电压升高的数值，这样可以避免设备过压运行，延长其寿命，并提高电网的可靠性，使电网运行更加稳定。

2.2 降低操作过电压

电网中的电容、电感等储能元件，在发生故障操作时，由于其工作状态发生突变，将产生充电再充电或能量转换

的过渡过程，电压的强制分量叠加以暂态分量形成操作过电压。其作用时间约在几毫秒到数十毫秒之间。操作过电压的幅值与电网的运行方式、故障类型、操作对象有关。对 330kV、500kV 和 750kV 空载线路合闸和重合闸产生的相对地统计过电压，分别不宜大于 2.2p.u.，2.0p.u 和 1.8p.u.，(P.U. 对应系统最高运行相电压 kV)。上述讲到工频过电压为操作过电压的强制分量，当降低工频过电压时，可以起到降低操作过电压的目的。

2.3 避免发电机带空载长线路出现自励磁过电压

并联电抗器在高压电网中的应用之三是避免发电机带空载长线路出现自励磁过电压。在电力系统中，发电机的励磁系统起着控制发电机电压和无功功率的重要作用。当发电机带动空载或轻载长线路时，发变组可以整体看做电感原件，水轮发电机正常同步运行时，其电抗在 $X_d \sim X_q$ 之间呈周期性变化，而汽轮发电机，同步运行时期电抗 $X_d = X_q$ 不作周期性变化，但是在异步运行或定子磁通变动下的同步工作状态时，无论水轮发电机还是汽轮发电机，它们的电抗均在 $X_d \sim X_q$ 之间作周期性变化，其与线路对地电容构成 LC 回路，电感储存的电能全部转化为电容 C 的电场能，导致电容电压升高，引起发电机自动磁过电压。

发电机不发生自励磁过电压判据： $W_n > Q_c * X_d''$

W_n : 发电机容量 MV.A Q_c : 线路净充电功率 Mvar

X_d'' : 发变组等值同步电抗标么值(发电机容量为基准)

如上公式可知，当在线路中并入高压并联电抗器后，可以降低线路充电功率，使上述公式成立，同时消除发电机自励磁过电压现象。

2.5 有利于单相重合闸

在我国超高压和特高压电网中，为了提高系统运行稳定性一般采用单相重合闸装置。在重合闸过程中，当故障相因接地故障断开后，受到线路相间电容的影响，带电相会对通过相间电容对地相的接地点持续提供电流，这增加了故障点自动熄弧的难度，可能会导致自动重合闸的失败。

在超/特高压系统中，由于系统的电压等级高，输送容量大，线路长的特点，使得潜供电弧持续时间长，难以自行熄灭。在装有并联电抗器的线路上，可以利用高抗 X_r 中性点加装小电抗 X_n 的方法，利用电路等效变换，相间会等效一个电抗 X_1 ，同时相对的为 $X_r + 3X_n$ 的电抗，此时，线路相间容抗 X_c 基本等于 X_1 ，电流会在并联电抗器上形成回路，减少对故障点的潜供电流，从而利于单相重合闸的成功。

3 并联电抗器常见问题分析

3.1 空心并联电抗器问题及分析

3.1.1 噪音问题

干式空心并联电抗器一般运行在变电站户外，上部装有防雨帽防鸟罩，下部为绝缘子和玻璃钢支柱作为电抗器支撑件，中间为电抗器本体，一般空心电抗器容量较大，投运后绕组内部的电磁力导致线圈整体振动，现场运行噪音一般来源于 2 个部位：(1) 玻璃钢支柱或防雨帽等部位的连接紧固

问题,如螺栓松动、接地铜排与玻璃钢柱体存在缝隙等,线圈运行时,带动这些松动部位引起共振,会引起局部噪音加大,此时可以通过紧固件排查,消除该噪音。(2)强磁场下的金属物振动噪音,如包封气道内部遗落的金属垫片、螺母等,其在电抗器的强磁场下会进行工频振动,引起噪音增加,此时排查包封内部有无金属遗落,可以消除该噪音隐患。

3.1.2 运行故障问题

空心并联电抗器为户外运行产品,长期运行时受到日晒、污秽、雨水侵蚀,表面绝缘层会出现老化开裂,线圈表面因上下电位差及下部电位不均衡导致沿面爬电等现象,一旦侵蚀到线圈内部绕组,会加速绕组绝缘性能下降,最终导致匝间绝缘击穿。针对上述问题,需要从生产工艺到运行维护上给予重视。1、在生产工艺方面,应采用抗张性能较好的材料,保证线圈长期运行不开裂。同时在线圈内外喷涂 RTV 胶,防止污秽爬电。2、线圈在运行中,定期进行检修维护,包含电阻测量,包封及外观绝缘层老化检查,出现异常情况应及时进行维护处理。

3.2 干式铁芯并联电抗器运行问题及分析

3.2.1 本体发热问题

干式铁芯并联电抗器一般应用于轨道交通或城市变电站内,户内或户外箱体放置运行,干式铁芯电抗器一般为满负荷运行,发热量主要为 3 相绕组和铁芯的发热,一般有功损耗为几千瓦到几十千瓦不等。对于箱式电抗器运行,一般表现为箱体内部环温过高超过 40℃,引起电抗器铁芯和线圈散热不良,导致电抗器本体温度较高,针对这种情况,应检查箱体抽风机运行情况,箱体自身散热风能否满足电抗器运行需要。同样,对于容量 6000kvar 及以上的干式铁芯电抗器室内放置时,也应考虑室内排风机的排风能力,应能保证室内环境温度小于电抗器的最大环境承受能力,否则,应考虑停止设备运行,并进行通风改造。

3.2.2 噪音问题

铁芯电抗器噪音主要为铁磁振动,电抗器为了增大铁芯磁阻,减小励磁电抗,铁芯柱一般分成若干段,中间使用绝缘填充,最后整体采用高温胶灌封固化。在正常运行时,若芯柱中间灌封胶没有封堵完全,或上下轭铁夹件没有夹紧铁芯,则会产生较大噪音,此外室内电抗器受到地基下部空腔影响或室内声波反射,也会产生较大噪音。处理措施:对于较大容量干式铁芯电抗器放置室内,因可能会与地基产生空腔共振,可以考虑底座下部加装有效的减震措施,如:加厚橡胶垫或减震弹簧。对于因铁芯产生的噪音,可以采取现场芯柱补充密封胶或紧固线圈垫块等措施,保证电抗器运行噪音处于合理水平。

4 并联电抗器在高压电网中的发展趋势

随着电力系统的发展,越来越多的技术创新和改进被应用于并联电抗器的设计和制造中。这些创新和改进旨在提升并联电抗器的性能和可靠性及实现动态调节的功能,以满足日益增长的电力需求。

技术创新和改进:

(1)随着材料科学和制造技术的进步,新材料和制造工艺被应用于并联电抗器的制造中,例如,针对空心电抗器采用咪唑类固化体系,增强电抗器夏季生产过程中的抗潮能力,提升电抗器本体的机械性能和电气性能。干式铁芯电抗器采用更加优良的配方体系和更高的耐热绕组线,提升电抗器整体安全性能。损耗方面,铁芯电抗器采用更加优良的有取向硅钢,例如 27Q100 等性能较高的硅钢,降低电抗器自身的有功损耗,减少系统运行损耗。

(2)控制和保护技术的创新也在并联电抗器中得到应用,通过引入先进的控制和保护系统,可以实现对并联电抗器的精确控制和实时监测。这样可以提高电网的稳定性和可靠性,并降低故障的发生率。可控电抗器的发展与应用,可以实现对系统无功平衡的精确补偿,超(特)高压输电线路在传输小功率时,并联高抗可起到限制工频过电压的作用,但当传输功率接近或大于自然功率时,高抗就成为多余的装置,它不仅使线路电压过分降低,且其无功电流会在电网中造成附加的有功损耗,降低了全网的经济效益。因此,可控并联电抗器能做到容量可调且能快速反应,可控并联电抗器能随线路传输功率的变化而自动平滑地调节自身的容量,且能降低线路操作过电压水平,提高了电网的运行效益。

5 结语

通过对并联电抗器在高压电网中的应用的探讨,可以发现并联电抗器在高压电网中具有广泛的应用前景,并联电抗器可以通过补偿电网的无功功率,改善沿线无功分布,来实现无功平衡,稳定系统运行电压。未来,并联电抗器的发展趋势将主要体现在技术创新和改进以及应用领域的拓展和扩大。相信随着技术的不断发展和应用的不断推广,并联电抗器在高压电网中的应用将会得到进一步的推动和发展。

[参考文献]

- [1]刘振亚.特高压交直流电网[J].中国电力出版社,2013(9):126-136.
- [2]鲁水林.水利电力部西北电力设计院[J].电气一次设计手册,1991(9):863-869.
- [3]张丽.并联电抗器在超(特)高压电网中应用及发展[J].科技风,2016(15):173.
- [4]鲁水林.特高压接入后江西电网安全性的仿真分析及对策研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [5]陶力维.浅谈可控并联电抗器在超特高压电网中的应用[J].河北工程技术高等专科学校学报,2014(2):42-44.
- [6]禹惠琴.浅谈高压电网中装设并联电抗器的必要性[J].科技与企业,2013(24):427.
- [7]成欢.分级式高压可控并联电抗器微机在高压电网中的运用[J].机电信息,2011(36):79-80.

作者简介:张亮(1985.5—),专业:电气自动化,职称:工程师,主要从事变压器、电抗器技术生产工作。