

高压限流电抗器在江苏电网的应用研究

周洪伟, 王海潜, 祁万春

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 210008)

摘 要: 随着江苏电网规模的不断扩大,系统短路电流水平逐年增长,在江苏电网中加装高压限流电抗器成为未来解决短路电流问题的新途径之一。以远景苏南 220kV 分区电网几种典型的结构模式为范例,研究了应用高压限流电抗器控制分区 220kV 电网短路电流水平,维持原有电网结构,提高分区供电能力的可行性。

关键词: 短路电流; 限流电抗器; 分区供电能力; 分区电网结构

随着江苏电网规模的不断扩大,系统短路电流水平逐年增长,某些高压开关设备的遮断容量已接近或超过了额定值。目前为解决此问题,在规划和系统设计阶段,主要从改变电网结构、调整系统运行方式和改变设备性能参数三方面进行短路电流限制,以保证电网安全稳定运行。

改变设备性能参数目前主要是采用高阻抗变压器、在主变中性点加装小电抗器等措施对短路电流进行限制。针对江苏电网密集程度日益加大,电气距离和电气强度日趋紧密的现实情况,江苏电网主要通过采用高阻抗变压器(主要是 500/220kV 主变)以限制 500kV 变电站 220kV 母线的短路电流水平,从而达到控制整个分区 220kV 短路电流水平的目的。该方法取得了良好的效果,并在近期的规划建设中得到充分应用。

随着电力负荷的进一步增长以及 500/220kV 分区内 500kV 变电站逐步达到其设计满容量规模,加上局部地区接入 220kV 电网电源的增加,短路电流水平的控制日趋紧迫。同时,500/220kV 分区内 220kV 短路电流水平的控制也成为提高分区内电源可接入数量,从而提高分区供电能力和分区间互联,提高电网规模效益的关键制约因素。因此,在现有改变电网结构,应用高阻抗变压器以及母线分段、分排等限制短路电流措施的基础上,进一步研究高压限流电抗器对短路电流水平的限制作用,显得十分必要。

本文以远景苏南 220kV 分区电网几种比较典型的结构模式为范例,研究远景苏南地区 500kV 站逐步扩建至规模容量,其 220kV 短路电流难以控制时,通过应用高压限流电抗器控制分区 220kV 电网短路电流水平,维持原有电网结构,提高分区供电能力

的可行性。

1 国内外应用现状

本文高压限流电抗器指的是 220kV 及以上电压等级的限流电抗器。限流电抗器一般串联在电力系统中,当发生短路时,利用其电抗特性限制短路电流在某一确定的限值内,以利开关设备顺利有效的切除故障。限流电抗器一般均是采用干式空芯电抗器。高压限流电抗器已广泛应用在国外输电网中,在国内也有应用,下面介绍几个高压限流电抗器应用实例。

1) 上海泗泾站: 上海泗泾 500kV 变电站与其相连的黄渡和南桥变电站 500kV 断路器遮断容量为 50kA。为限制短路电流,避免大规模的更换设备,2008 年在 500kV 黄渡~泗泾双回线路的泗泾变电站侧安装了 2 组 14Ω 的 500kV 限流电抗器,取得了良好的效果。目前正在开展 500kV 南桥变加装高压限流电抗器的前期研究工作。

2) 英国输电网^[1]: 英国输电网中,为限制短路电流,高压限流电抗器得到了广泛的应用,在母线分段之间、线路侧、主变侧均有加装高压限流电抗器的实例。如在 Grain 和 KingsNorth 变电站母线分段之间加装了 400kV 高压限流电抗器;在 Elstree~Sundon 线路 Elstree 变电站侧加装了 400kV 高压限流电抗器;在 High Marnham 变电站主变侧加装了 275kV 高压限流电抗器。

3) 巴西 Tucuruí 水电厂^[2]: 在一、二期机组串与串之间装设串联电抗器,既实现一、二期机组高压母线的互联,提高系统的可靠性,又将短路电流控制在 40kA 以下。

4) 美国 345kV 电网: 2001 年,美国纽约电网

的联合爱迪生系统由于新机组的接入, 345kV 电网短路电流超过了现有断路器遮断容量, 因此在 4 回 345kV 线路串接了 4 台高压限流电抗器, 以满足断路器遮断容量要求。

另外, 在高压限流电抗器的基础上, 可采用各种可靠开关技术实现高压限流电抗器的可控化, 例如短路电流限制器^[3-4] (fault current limiter, FCL), 晶闸管保护型串补^[5] (thyristor protected series capacitor, TPSC), 其中 FCL 已于 2009 年在浙江瓶窑~杭北单回线路的瓶窑变电站侧投入应用, TPSC 则在美国南加州爱迪生 (Edison) 电力公司的多个 500 kV 变电站中投入应用。

2 在江苏电网中的应用研究

2.1 限流电抗器的可选安装地点

在 500/220kV 分区电网中, 高压限流电抗器通常有 4 个安装位置 (如图 1 所示): 分区 500kV 站主变回路 500kV 侧、分区 500kV 站主变回路 220kV 侧、分区 500kV 站 220kV 分段开关回路、分区 220kV 主力电源的送出线路。

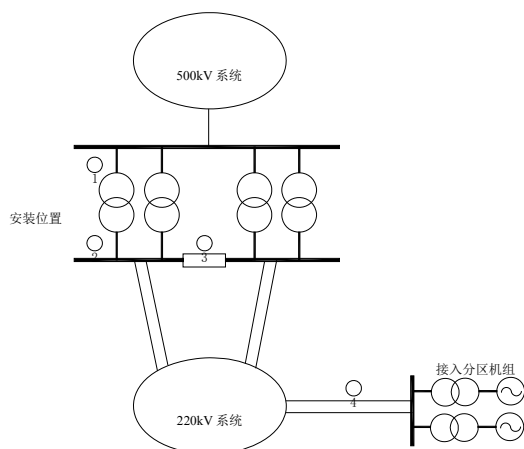


图 1 高压限流电抗器安装位置示意图

2.2 分区 220kV 电网的结构模式

根据规划远景年份的分层分区情况, 分区 220kV 电网结构本文主要考虑以下 3 种典型模式, 如图 2~4 所示。

图 2 所示为单个 500kV 站 3 台及以上 500kV 主变并列运行供电一片电网的模式, 江苏苏州电网石牌分区、无锡电网梅里分区即为该模式的典型范例; 图 3 所示为单个 500kV 站 4 台主变 (220kV 分段开关打开) 供电一片电网, 其中分区 500kV 站两段

220kV 母线通过外部电网构成联络的模式, 远景江苏常州电网武北分区为该模式的典型范例; 图 4 所示分区中两个 500kV 站通过 220kV 双环网, 为负荷中心供电的模式, 江苏南京江南主城电网即为该模式的典型范例。模式 2、3 中分区电网供电能力与 220kV 联络线路长度、型号相关, 本文结合苏南电网实际情况, 模型 2 中两段 220kV 母线间的联络线路取 20km 双回 LGJ-2×400 线路, 模式 3 中两个 500kV 站 220kV 母线间的联络线路取两个双回 60km LGJ-2×400 线路。

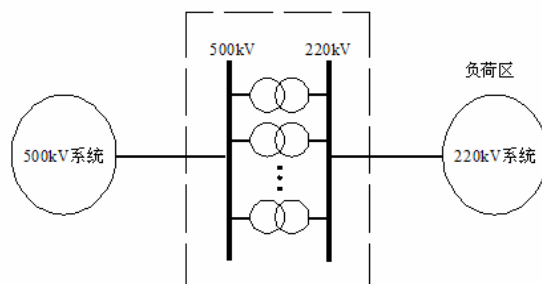


图 2 模式 1：单个 500kV 站 3 台及以上 500kV 主变并列运行独立成片

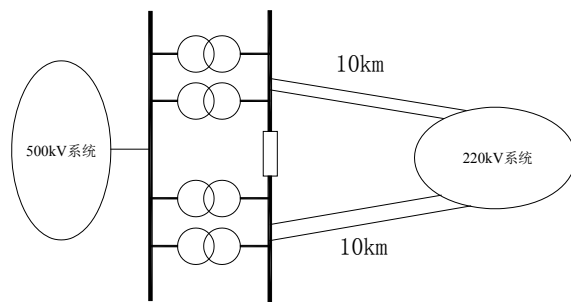


图 3 模式 2：单个 500kV 站 4 台 500kV 主变独立成片（分段开关打开，两段母线通过外部电网构成联络）

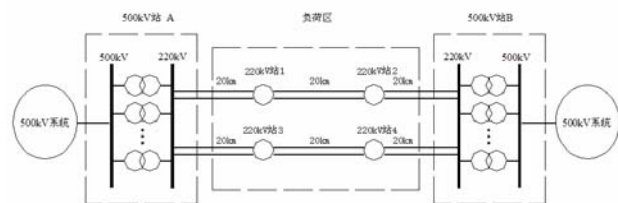


图 4 模式 3：两个 500kV 站以 220kV 双环网供电一片负荷

2.3 电源模型

提供分区 220kV 电网短路电流的电源主要是 500kV 系统和接入 220kV 电网的机组。本文结合江苏电网实际情况使用如下模型 (如图 5、6 所示) 对其进行等效, 其中阻抗参数为标么值。

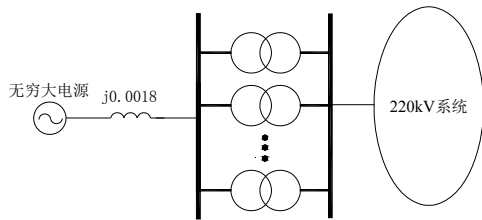


图 5 500kV 系统等效模型

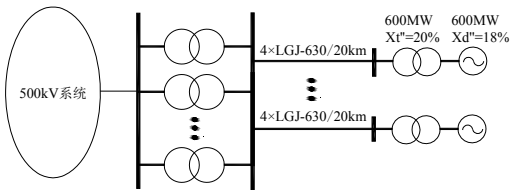


图 6 接入 220kV 电网机组等效模型

上述模型中 500kV 变电站 500kV 母线短路时 500kV 系统提供约 60kA 短路电流；接入 220kV 电网电源使用多个 600MW 机组等效，每个等效机组与 500kV 站 220kV 侧的电气距离相当于 20km LGJ-4×630 线路,分区 500kV 变电站 220kV 母线短路时，机组提供的短路电流约为 3.8kA/600MW。

需要指出的是，上述电网结构模型和电源模型的电气距离考虑了江苏苏南电网实际的输电半径和负荷密度。在电网结构较为稀疏的地区(例如苏北)，电气距离应相应增大，单位容量机组提供的短路电流将减小。

2.4 计算分析

按照 500kV 站 220kV 母线短路电流不大于 49kA 的要求，模式 1 下分区 220kV 电网的供电能力如表 1 所示。

表 1 分区供电能力计算结果表			万 kW, 万 kVA
500kV 主变容量	分区内可装机	500kV 站供电能力	分区供电能力
3×100	240	247	468
4×100	120	370	480

由表 1 可见，对于模式 1 下的 220kV 分区，由于受 500kV 变电站 220kV 母线短路电流水平控制的限制，其供电能力限制在 470~480 万 kW 左右（此时分区 500kV 站 220kV 短路电流约 48kA）。若该片区负荷进一步增大，就需要考虑应用高压限流电抗器控制 220kV 短路电流，以便能够接入更多的 220kV 电源或配置更多的 500kV 变电容量。

本文以分区 500kV 站配置 4×100 万 kVA 主变，

接入 220kV 机组 2×60 万 kW 的典型分区为范例，研究模式 1 下的 220kV 分区应用高压限流电抗器提高分区供电能力。

高压限流电抗器可选安装的位置如图 1 所示，其中考虑工程实施可行性及对 220kV 电网潮流、电压的影响，限流电抗器的阻值按不大于 15Ω 考虑。上述位置安装了高压限流电抗器后，若该分区新增 2 台 60 万 kW 级机组或增加 1 台 100 万 kVA 主变时，分区 500kV 站 220kV 短路电流如表 2 所示。

表 2 短路电流计算结果表						kA
500kV 站 220kV 短路电流	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	
新增 2 台 60 万千瓦级机组	55.3	48.8	48.5	48.7	51.0	
增加 1 台 100 万千瓦主变	54.3	47.2	46.8	48.3	52.1	

注：方案 1，未装设限流电抗器；方案 2，在 500kV 主变回路 220kV 侧装设 3Ω 限流电抗器（相当于主变阻抗提高至 26%）；方案 3，在 500kV 主变回路 500kV 侧装设 15Ω 限流电抗器；方案 4，在 220kV 分段开关回路装设 10Ω 限流电抗器；方案 5，在各电厂送出线路装设 15Ω 限流电抗器。

根据短路电流计算的结果，在不同位置安装限流电抗器的效果如下：若要在远景 500kV 短路电流水平接近 63kA 的情况下将分区供电能力提高 100 万 kW 左右(通过新增 2 台 60 万 kW 级机组或增加 1 台 100 万 kVA 主变实现)，需要在每台 500kV 主变的 220kV 侧装设 3Ω 限流电抗器，或在其 500kV 侧装设 15Ω 限流电抗器；若将限流电抗器装设在 220kV 分段开关回路，其阻抗值则需达到 10Ω；若限流电抗器装设在电厂送出线路上，其阻抗值即使达到 15Ω，500kV 站 220kV 短路电流无法控制在 49kA 以内。

考虑限流电抗器上可能通过的潮流，方案 2~方案 4 高压限流电抗器容量等参数如表 3 所示。

表 3 限流电抗器容量等参数计算比较表			
限流电抗器参数	方案 2	方案 3	方案 4
限流电抗器阻抗值/Ω	3	15	10
限流电抗器额定电流/A	4000	1800	4000
限流电抗器单组容量/Mvar	48	49	160
限流电抗器组数	4×3	4×3	2×3
限流电抗器总容量	576	588	960

可见，方案 2、方案 3 需要装设的限流电抗器

容量相当,且明显小于方案 4(限流电抗器的投资主要取决于容量)。

根据潮流计算分析,各方案分区的供电能力如表 4 所示。

表 4 分区供电能力计算结果表 单位:万千瓦

供电能力	方案 2		方案 3		方案 4	
	4 台主变	5 台主变	4 台主变	5 台主变	4 台主变	5 台主变
分区内可装机	240	120	240	120	240	120
500kV 站供电能力	370	475	370	475	340	450
分区供电能力	590	585	590	585	560	560

潮流计算的结果表明:方案 2、方案 3 下分区 500kV 站主变能够并列运行且降压均衡,其最大供电能力较方案 4 高约 25~30 万 kW;限流电抗器装设后 220kV 电压跌落约 2kV,220kV 电网电压水平仍在运行允许范围内。方案 4 下 220kV 分段开关回路装设限流电抗器后 500kV 主变降压不均衡;限流电抗器装设后 220kV 电压未出现跌落。

综合考虑提高分区供电能力、对分区 220kV 电压的影响及投资,方案 2、方案 3 优于方案 4(方案 5 不可行)。方案 2 与方案 3 相比,在投资上,尽管方案 2 与方案 3 所需的容量基本一致,但方案 3 下高压限流电抗器安装在 500kV 侧时所需的绝缘水平较高,导致投资较高。因此,本文推荐在 500kV 主变回路 220kV 侧装设限流电抗器的方案。

通过对模式 1 下高压限流电抗器安装位置的比选分析发现,在 500kV 主变 220kV 侧装设限流电抗器相对较优。因此,本文按限流电抗器装设在 500kV 主变 220kV 侧考虑研究模式 2、模式 3 下应用限流电抗器提高分区供电能力的可行性。

经计算分析表明,模式 2、模式 3 下通过应用高压限流电抗器,分区供电能力可至少提高约 110 万 kW。

2.5 小结

本文以远景苏南电网 220kV 分区的 3 种典型结构模式为范例,研究了应用高压限流电抗器控制分区 220kV 短路电流水平,提高分区供电能力的可行性。

潮流、短路计算的结果表明,在 500kV 主变回路 500kV 侧、500kV 主变回路 220kV 侧及 220kV 分段开关回路上装设高压限流电抗器均能够有效控制分区 220kV 短路电流,显著提高分区供电能力

(80~100 万 kW 乃至更高),而在分区内 220kV 主电源的送出线路装设限流电抗器的效果则相对较差。在可行的 3 个方案当中,综合考虑提高分区供电能力、分区 220kV 短路电流控制效果、对分区 220kV 电网电压的影响、实施可行性及投资等方面因素,本文认为在 500kV 主变回路 220kV 侧装设限流电抗器相对其他方案较优。

3 结束语

1) 高压限流电抗器在国外已应用广泛,国内在上海泗泾站已得到首次应用。上海泗泾站的高压限流电抗器自 2008 年投运以来运行状态良好,投运前的短路电流试验也证明其限制短路电流效果明显。因此可以认为,高压限流电抗器技术已经成熟,是一种切实可行的短路电流限制装置。

2) 江苏地区以往通过系统以及采用高阻抗变压器及分段开关等手段基本能解决 220kV 及以上电网的短路电流问题,因此,在江苏高压电网中一直未采用高压限流电抗器来限制短路电流,但在江苏中低压电网中,限流电抗器应用还是较为广泛的。随着江苏电网规模的不断扩大,以及设备制造水平的不断提高,在江苏电网中加装高压限流电抗器可以成为未来解决短路电流问题的新途径之一。

3) 计算分析得结果表明:随着电力负荷的进一步增长及江苏 500kV 变电站逐步扩建到设计满容量规模,仅依靠现有措施将难以控制分区内 220kV 短路电流,此时可以通过应用高压限流电抗器控制分区 220kV 短路电流,以便分区中可装设更多的 500kV 主变或接入更多电源,进一步大幅提高分区供电能力及规模,充分发挥电网的规模效应。

参考文献:

- [1] 英国输电网七年规划(National Electricity Transmission System Seven Year Statement) [R], National Grid Electricity Transmission plc (NGET), 2011 年 5 月出版.
- [2] J. Amon F., P. C. Fernandez, E. H. Rose, A. D'Ajuz, A. Castanheira. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation[C]. 外文会议 2005.
- [3] 赵强,张丽.故障电流限制器现状及应用前景[J]. 电力建设,2008,29(1):44-47.
- [4] 王华听,习贺勋,汤广福,等.面向超高压电网的故障限流

器的应用研究[J]. 高电压技术,2007,33(5):99-102.

- [5] 贾贵玺,李洪凤,贺家李. 具有可控串补功能的短路限流器的研究[J].电工技术学报, 2005, 20(11):20-25.

王海潜（1963-），男，江苏南京人，高级工程师，从事电网规划研究工作；

祁万春（1979-）男，江苏盐城人，工程师，从事电网规划研究工作。

作者简介：

周洪伟（1979-），男，江苏淮安人，高级工程师，从事电网规划、电气一次设计、过电压的研究等工作；