

提升特高压电网输电能力的方法

董宸¹,周霞¹,李威¹,薛峰¹,李晖²,王智冬²

(1.中国电力科学研究院,江苏南京 210003;2.国网北京经济技术研究院,北京 100761)

摘要:随着电力负荷的快速增长及大规模新能源的集中接入,特高压、长距离、大容量输电将成为未来我国电网的发展方向。以特高压电网为背景,结合国内、外提升电网输电能力先进经验,尤其是电网新技术、新材料、新方法应用的研究,综合阐述了影响电网输电能力的主要因素。在此基础上给出了现阶段可行的提升电网输电能力的方法和各自的特点,并按照实施方法将其分为三类,包括改变电网网架结构、改变电网电气特性和加装安全稳定控制装置。结合特高压电网的网络特性,研究了各种方法对特高压电网的适用性,提出了适合特高压输电网络的方案。

关键词:特高压电网;输电能力;柔性交流输电;直流调制

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)05-0001-04

我国地域辽阔,发电能源主要集中在中西部地区,而负荷则主要集中在东南部和中部地区。输送规模大、输电距离长是我国电网未来发展过程中的主要特点^[1]。特高压电网代表了当今世界最高电压等级的输电技术,由1000 kV交流和800 kV直流输电网络组成,具有大容量、远距离、低损耗输电等特点^[2]。特高压交流电网将经历弱交流联网、特高压电磁环网、强交流联网等发展阶段,还存在交直流混联运行,这些都使得特高压电网的安全稳定特性变得极为复杂,各个时期的输电能力也有较大差别。以特高压电网为背景,通过分析影响电网输电能力的主要因素及受限原因,结合国内、外提升电网输电能力的先进经验,尤其是电网新技术、新方法应用的研究,对各种提升电网输电能力的方法进行了综合阐述,并分析了各自的特点,结合特高压电网的网络特性及发展趋势,研究了其对特高压电网的适用性及应用效果。

1 影响电网输电能力的主要因素和受限原因

电网的输电能力是指电网在一系列的约束条件下能够传输功率的能力。随着电网的发展、运行特性的改变,制约电网输电能力的主要因素也会发生变化。一般来说,在电网发展初期,暂态稳定、动态稳定和电压稳定问题是制约电网输电能力的关键因素。而电网发展的后期,热稳定水平限制等因素则会成为影响输电能力的关键。

(1) 热稳定水平限制。系统热稳定水平主要由电网中元件的额定容量决定,目前电网中线路、主变等额定容量偏低是导致热稳定水平受限的主要原因。

(2) 暂态稳定水平限制。远距离送出线路及跨省联络线的电气联系相对薄弱,使得暂态稳定问题比较

突出,是导致系统暂态稳定水平受限的关键因素。此外,电磁环网也容易引发暂态稳定破坏。

(3) 动态稳定水平限制。电力的送出会因系统阻尼差而受到约束,通常区域电网之间靠周边单点弱联、形成长链式结构,或者电网属于大型水电强送系统的,动态稳定问题会比较突出。此外,远距离重负荷送电的发电机及其快速励磁调节系统也容易产生负阻尼。

2 提高特高压电网输电能力的方法

一般来说要提高电网输电功率,可以从提高电压等级、减小线路电抗、缩小系统间功率夹角等三方面考虑。本节将基于特高压交直流电网规划及典型发展趋势,提出有效提升特高压电网输电能力的方案^[3-6]。

2.1 改变电网网架结构

国内外的经验表明,坚强的网架是提高输电能力的基础,因此通过改变电网网架结构的方法可以提高输电能力。除增加送电走廊、采用紧凑型输电技术(提高单位走廊的输电能力)、采用大截面导线和耐热导线技术(提高线路热容量)、变压器扩容以及采用大功率直流输电技术等常规方法外,还可以考虑电磁环网解环、拉停线路和线路出串运行等方法。

2.1.1 电磁环网解环

高低压电磁环网是指2组不同电压等级运行的线路通过变压器或电磁耦合构成的环形电网,是电网发展初期必然要经历的一个过程。在电网建设初期,网架结构比较薄弱,电磁环网运行可增加供电可靠性。但随着电网的发展和网架结构的加强,电磁环网对电网供电可靠性的影响降低,反而由于潮流转移、短路电流超标等问题,会制约电网的输电能力。实施电磁环网解环后,高压线路的输送能力能够得到更好地发挥,可以提高电网输电能力、减少输电线路损耗。

2.1.2 拉停线路和出串运行

收稿日期:2013-04-25;修回日期:2013-06-03

国家电网公司重大专项资助项目(SGCC-MPLG001-2012)。

在实际电网运行中,经常会出现电网整体输电能力受限于某一主变或线路热稳的情况,该主变或线路即是通常说的电网中的“卡脖子”元件。

对电网中的“卡脖子”元件实施改造,发挥网络整体能力,避免个别元件造成电网整体输电能力受限,是最佳解决方案。但是由于某些客观原因,如场地限制、造价限制、工期等,会出现元件的改造升级远远滞后于日益增长的供电需求。在这种情况下,可以考虑通过拉停线路和出串运行来暂时缓解矛盾。

例如电网中的电磁环网运行时,某些低电压等级线路的热稳限额会限制高压线路的输电能力。在该电磁环网暂时无法进行解环的时候,通过拉停某一或某些“卡脖子”线路,可以大大提高电网的输送能力。在大负荷时,主变容量也有可能成为约束整个电网的输电能力的关键,需要新增主变来满足需要,但由于场地、造价、工期等原因,新增主变只能采用通过1个开关直接运行于母线的方式接入,即出串运行。

通过拉停线路和出串运行的方式来增加电网输电能力,都属于“权宜之计”,其输电能力的提高是以牺牲某一区域的供电可靠性来实现的,只能暂时缓解电网输电能力不足与设备改造缓慢之间的矛盾,建议将其作为一种短期的过渡手段使用。

2.2 改变电网电气特性

对于特高压、大容量的系统,线路输电容量不仅仅决定于自然功率,还决定于输送的距离、两侧电源的强弱、系统结构和稳定条件。

2.2.1 柔性交流输电(FACTS)技术

FACTS技术以大容量晶闸管为基础,不仅可以增加输电线路的输电能力,还可以改善输电系统的灵活性。在这种系统中,网络潮流更易于控制,线路的输电能力大幅度提高,各种故障得以及早隔离,以致系统更灵活、稳定、可靠。先进串联补偿(ASC)是一种由晶闸管基本元件和高功率电子管(带常规串联电容器)组成的FACTS装置。美国联络新墨西哥州的Shiprock和亚利桑那州的Glen Canyon的230 kV线路上装设ASC后,输电能力从300 MW增加到了400 MW。

潮流控制器(SPFC)是一个FACTS逆变器通过一个变压器串联接入系统而不是并联接入系统。SPFC除了能提供容性串补外,还能提供感性的串补,它也可以插入串联电压改变潮流方向。如果SPFC被用于交换有功功率,插入电压需正交于线路电流的限制将被取消,这就改变了装置的特性。如果功率交换既可以送入系统又可从系统送出,SPFC就成为统一潮流控制器(UPFC)了。装设于线路的UPFC可以极大地输送有功,极小限度地输送无功,可应用于那些需要获得最大可能利用效率的线路上。

目前已证实,在一些关键输电走廊采用FACTS技术可使输电能力增加一倍^[7-10]。

2.2.2 加装串补

大功率远距离输电,受端缺乏足够的电源支撑,电压和动态稳定问题成为制约输电能力的主要因素。通过加装串联电容补偿器,降低输电线路的等效电抗,可以提高特高压远距离输电线路的输电能力和系统稳定性,且对输电通道上的潮流分布具有一定的调节作用。串联电容补偿器直接与线路串联,可装设在线路首末两端或线路中点,主要由电容构成固定串补(FSC),也可由晶闸管控制电路构成可控串补(TCSC)。TCSC通过晶闸管控制进行无功功率动态补偿,其补偿度可以根据系统运行方式调节,但造价比FSC高很多。系统中串联补偿总容量可根据工程实际情况,采用大部分FSC加小部分TCSC^[11]。

目前利用串联电容补偿器提高输电能力的技术已广泛应用于国内外电网,瑞典、加拿大、巴西和美国都曾采用串联补偿技术来提高线路的输电能力。现有特高压规划中,在不增加输电走廊的情况下,通过在长距离线路安装串补,满足功率输送需求。试验证明在蒙西、陕北、川西等特高压通道加装40%串补度后,各通道的特高压线路平均输送功率都在400万kW以上。平均每回线路输电能力提高100万kW,提高比例约25%,效果非常明显。

由于FSC和TCSC提高输电能力的有效性在很大程度上取决于装置的安装地点和补偿容量,因此国内外已有很多学者从增大负荷裕度、提高输电能力的角度研究FSC和TCSC的最优配置问题。另外由于系统中增加的串联电容补偿设备改变了系统之间原有的电气距离,尤其串补度较高时,可能引起过电压、潜供电流、断路器暂态恢复电压(TRV)及次同步谐振(SSR)等问题。

2.2.3 加装可控高抗

特高压输电线路的充电功率很大,每100 km的1000 kV线路的充电功率约达到530 Mvar。为限制工频过电压,1000 kV线路安装了大容量的高压电抗器,这将导致线路广义自然功率下降,轻载负荷运行情况下线路的电压偏高,或者重载负荷运行情况下线路电压偏低,为此,在变压器的低压侧还需安装低压无功补偿装置。这样一方面将增加无功补偿设备的投资,另一方面由于受到变压器低压侧绕组容量的限制,即使按最大可能配置低压无功补偿设备也无法适应重载线路的无功需求。可控高抗是解决限制过电压和无功调相调压之间矛盾的有效手段之一,其容量可根据线路输送功率的大小实现平滑或者分级调节,在一定程度上抑制电压在小负荷方式下过高或大负荷方式下过低,

同时能在故障瞬间将容量调节至最大,限制故障引起的过电压^[12]。

对特高压典型网架分析后发现,在长距离、大容量特高压输电通道,如陕北、蒙西等送出线路以及进出线较多的枢纽变电站,如豫北、驻马店、长沙等变电站加装可控电抗器对提高系统输送能力的作用较为明显。

2.2.4 加装动态无功补偿装置

动态无功补偿技术可根据系统需要快速调节无功、维持母线电压在额定值附近。对于长距离输电线,在中间变电站采用动态无功补偿技术可以提高线路输电能力、改善线路两端的电压水平。动态无功补偿技术广泛采用的是无功静止补偿装置(SVC),在长距离输电线路的中间安装一定容量的SVC能够提高线路的输电能力。SVC的基本功能就是从电网中吸收或向电网输送可连续调节的无功,以维持装设地点电压的恒定,进而缓解无功电压问题。在电能送出的关键节点装设SVC,通常还可提高电网的输电能力,并有利于电网的安全稳定运行。SVC主要应用领域包括^[13,14]:(1)抑制重要变电站负荷的电压波动和闪变;(2)配置在系统交流传输通道,改善系统稳定性,进而提高传输能力;(3)配置在薄弱区域,保证电网电压安全稳定等。在特高压长距离输电线路的电压支持薄弱点装设SVC,可充分发挥其对电压变化的快速控制能力,调整节点电压,增强系统阻尼,抑制功率振荡,从而提升输电线路的输送功率。

由上述分析可知,采用柔性输电装置、串补、可控高抗以及动态无功补偿装置等技术,可降低输电线路的电抗,缩短等效距离,改善线路两端的电压水平,使系统稳定极限大幅度提高,从而提高线路的输电能力。因此,柔性输电装置、串补、可控高抗以及动态无功补偿装置等技术目前已广泛应用于特高压电网,并取得了良好的经济效益。

2.3 加装安控装置

在电网薄弱点加装安控装置,利用安控措施增加系统暂态和动态稳定极限,以适应电网中可能出现的短期电源开机分布不合理的运行要求,是提高电网输电能力的有效方法之一。随着电网的发展,电网中的电源开机分布也在不断变化,一次电网要适应所有可能的变化必然要使电网的投资大大增加,否则电网稳定水平将降低。如采用适当的稳定控制装置,增加的投资不多,但提高了电网运行的灵活性、适应性。

随着特高压直流系统的建设,直流容量在整个电力系统输送容量中的比例进一步提高,高压直流输电将在优化资源配置方面发挥重要的作用。根据规划,在未来20年中,华东电网将出现7条或更多直流输电线路,华中电网也将出现10条或更多直流输电线路。相

比交流输电,直流输电有着其特有的显著优点:线路造价低、损耗小、能限制系统的短路电流,调节速度快、调节容量大,实现交流系统的异步联接等。大容量直流外送工程的集中投运对电网运行是一个新的挑战,同时也为电网安全稳定运行提供了新的控制手段,即通过直流调制改善电网运行的稳定性^[15-18]。

传统安稳控制措施一般为通过切机、切负荷来保持系统的稳定,代价较大。而直流输电系统在换流电压一定的前提下,换流器的触发角一旦改变,传输功率立即发生相应的变化,且变化量可按预期量自由调节,不像切机切负荷只能做到固定功率的变化。在保证电网安全的前提下,考虑直流调制与传统安控协调配合的安控措施,既可降低维持系统稳定所需的安控措施的繁琐程度,又可大大减轻调度人员的工作负担。

直流系统能够快速控制传输功率,当交流系统发生故障和扰动后,直流系统通过直流调制(紧急功率提升、速降)对系统的有功和无功功率进行调节,减轻扰动对交流系统的暂态冲击,提高交流系统阻尼,有效地抑制电网间的功率振荡,减少受扰系统的切机切负荷量,改善交流系统的暂态和动态特性,提高系统的输电极限。目前,国内外已有多个直流工程采用了直流调制技术,如美国、巴西、日本、新西兰和印度的直流工程,以及国内的天广和高肇直流等。

由于直流调制的基本原理是通过采取交流系统的信号(可能是频率、电压幅值、相位以及潮流)来调节的,且受到实际系统中换流阀过负荷能力、冷却系统的工作状态、送受端系统的无功补偿能力等因素的影响,因此在直流调制时需要采集大量的送、受端交流信号量,以广域测量技术(WAMS)为代表的通信与计算机技术为交流信号的准确和快速传输带来了质的飞跃,SCADA和PMU系统都已得到了广泛应用,解决了直流调制参与电力系统调度的主要问题^[19,20]。

3 结束语

我国经济的发展需要电网的坚强支持,建设远距离大容量的特高压输电网络是未来的发展方向,结合我国特高压电网的特点,分析了影响电网输电能力的主要因素,给出了现阶段国内外常用的提升电网输电能力的措施和方法,比较了它们各自的特点、应用条件及在特高压电网中的适应性:(1)改变电网网架结构的方法,多用于网架较为薄弱的区域电网,而特高压电网的电压等级已经是目前电网中最高的,线路输电能力强,网架结构也较为坚强,因此通过改变电网网架结构的方法提高输电能力对特高压电网而言,意义不大。(2)改变电网电气结构的方法,在已建成的网络架构上通过加装FACTS、TCSC、SVC及可控高抗等控制装

置来改变电网的电压、阻抗等电气特性,以提高其输电能力。具有安装地点可选性多,控制方式灵活多变等特点,也是目前特高压电网中应用较多的方法。但该类控制装置一般造价昂贵,经济效益稍差;(3)加装安控装置的方法,是根据电网存在的安全稳定问题,通过安控装置切机、切负荷及直流调制等控制手段,来提高电网的输电能力。与切机、切负荷等传统控制措施相比,直流调制的控制代价几乎可以忽略不计,因此将直流调制与传统安控协调配合的方法,在特高压电网中具有很好的应用前景。实际工程项目中,应根据具体情况分析,将各种措施优化组合,以达到最佳效果。

参考文献:

- [1] 郭剑波,武守远,荆平.提高电网输送能力的技术措施[J].电力设备,2005,6(10):4-7.
- [2] 刘肇旭,童建中.暂态稳定约束的电网供电能力的计算方法[J].中国电机工程学报,1987,7(3):18-23.
- [3] 王成山,魏炜,徐德儒,等.考虑发电机调度的电力系统输电能力的计算[J].电网技术,2001,25(9):21-23.
- [4] 奕军,张智刚,寇惠珍,等.提高500 kV电网输电能力的技术研究[J].电网技术,2005,29(19):15-17.
- [5] 周孝信,郭剑波,胡学浩.提高交流500 kV线路输电能力的实用化技术和措施[J].电网技术,2001,25(3):1-5.
- [6] 中国电力顾问集团公司.国家电网特高压骨干网架总体规划设计[R].2005.
- [7] 张立志,赵冬梅.考虑FACTS配置的电网输电能力计算[J].电网技术,2007,31(7):26-31.
- [8] 占勇,李光熹,刘志超,等.计及FACTS装置的最大输电能力研究[J].电力系统自动化,2001,25(5):23-26.
- [9] 张立志,赵冬梅.FACTS优化配置提高电网最大输电能力[J].电网技术,2006,30(1):58-62.
- [10] RAMEY D G, NELSON R J, BIAN J, et al. Use of FACTS Power Flow Controller to Enhance Transmission Transfer Limit [C], Paper Presented at American Power Conference, 1994.
- [11] 张健,冀瑞芳,李国庆.TCSC优化配置提高可用输电能力的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):23-28.
- [12] 周勤勇,李晶,秦晓辉.串补和可控电抗器在特高压电网的应用[J].中国电力,2010,43(2):36-38.
- [13] CANIZARES C A, FAUR Z T. Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse[J].IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(1):158-165.
- [14] 王云洁,胡弢.SVC电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响[J].江苏电机工程,2013,32(1):23-25.
- [15] 杨镛,张焰,宋平.特高压直流对交直流并联电网供电可靠性影响[J].华东电力,2011,39(6):0915-0918.
- [16] 张步涵,陈龙,李皇.利用直流功率调制增强特高压交流互联系统稳定性[J].高电压技术,2010,36(1):116-121.
- [17] 李国庆,张健.含VSC-HVDC的交直流系统可用输电能力计算[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):46-51.
- [18] 李刚,刘晓瑞,赵强.直流调制技术在西北电网应用的可行性研究[J].电网与清洁能源,2010,26(5):39-44.
- [19] 李大虎,曹一家.基于SCADA/PMU混合量测的广域动态实时状态估计方法[J].电网技术,2007,31(6):72-77.
- [20] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.

作者简介:

- 董宸(1982),女,安徽太和人,工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制研究工作;
- 周霞(1978),女,江苏海门人,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制研究工作;
- 李威(1976),男,江苏徐州人,高级工程师,从事电力系统运行与控制工作;
- 薛峰(1971),男,江苏无锡人,研究员级高级工程师,从事电力系统分析、规划与控制方面研究工作;
- 李晖(1981),男,河南郑州人,高级工程师,从事电网规划领域的研究工作;
- 王智冬(1981),男,吉林长春人,工程师,从事电网规划领域的研究工作。

A Method for Enhancing the Transmission Capacity of UHV Power grid

DONG Chen¹, ZHOU Xia¹, LI Wei¹, XUE Feng¹, LI Hui², WANG Zhi-dong²

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing, 210003, China;

2. Beijing State Grid Economic and Technology Research Institute, Beijing 100761, China)

Abstract: With the rapid growth of power load and the centralized integration of large-scale new energy, high voltage, long-distance and high-capacity transmission will become the direction of the development of power grid in the future in China. In the background of the UHV power grid, combining with domestic and foreign advanced experiences of enhancing the transmission capacity of the power grid, especially the researches of new technologies, new materials and new methods applied in the power grid, this paper elaborates the main factors affecting the transmission capacity of the power grid comprehensively. On this basis, it gives some feasible methods to enhance the transmission capacity and their characteristics in this stage. According to their implementation methods, they can be divided into three categories, including changing the structure of the power grid, changing the electrical characteristics and installing grid security and stability control devices. Combining with the network characteristics of UHV power grid, this paper examines the applicability of various methods for UHV power grid, and proposes a suitable solution for UHV transmission network.

Key words: UHV power grid; transmission capacity; flexible HVDC; DC modulation