

长链式电网分接头确定原则及其在南疆电网中的应用

朱国平¹, 王晓飞¹, 彭龙², 朱洪伟¹, 钟波¹, 杨光宇¹, 潘艳²

(1. 国网新疆电力公司疆南供电公司, 新疆 喀什 844000;

2. 南京南瑞集团公司北京监控技术中心, 北京 102299)

摘要:长链式电网电压控制问题较为突出,合理的分接头位置有重要意义。结合长链式电网运行特点,分别从大小负荷方式、事故后方式、检修方式和空充线路控制方面分析变压器分接头位置对电压控制的影响,综合四个方面下的电压控制找出最优的分接头位置,并将此方法应用到疆南电网库一阿一巴一喀工程。结果表明,采用分接头确定方法能够满足电网运行要求,对实际电网运行有一定参考意义。

关键词:分接头选择;电压控制;无功电压

Abstract: The voltage control of lone-chain power grid is more prominent, and the reasonable tap position is very important. Based on the operating characteristics of long-chain power grid, the influence of transformer tap position on voltage control is analyzed in four ways, and the optimal tap position is found out comprehensively from view of four voltage controls. The practicability and accuracy of the proposed method are analyzed by an actual power grid. The results show that the proposed method can meet the requirements of power grid operation and it provides a valuable reference to the actual power grid operation.

Key words: tap selection; voltage control; reactive voltage

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0018-05

0 前言

通过调节变压器分接头即改变变压器变比来调压是电网主要的调压措施之一。分接头的调节范围应能满足运行电压的要求,调节变压器分接头调整主要功能是调整无功分布。变压器分为有载调压变压器和无载调压变压器,前者多用于负荷变化频繁的情况下,后者一般用于分接头长期不需要调整的情况下,对于无载调压变压器,由于其分接头固定,因此其分接头位置需满足电网各种运行工况的调压要求^[1]。

通常确定分接头的原则为根据大负荷、小负荷运行方式的调压要求综合分析确定分接头的位置,采用分接头调压也有其局限性,根据变压器等值模型可知,调节分接头的位置其实是通过改变变比使两侧对地阻抗发生变化已达到调压的目的,对于两侧网络发展较为成熟、短路容量较大的系统调压效果不太明显^[2],但对于电网建设初期、网络联系薄弱的电网,变压器分接头的调压作用较为明显,影响

方面较多,需要兼顾高压网络的空充和事故后低电压和过电压控制的要求^[3-5]。

目前文献[6-8]集中在变压器分接头算法上的研究,对于实际电网特性分析较少,结合实际电网运行特性,总结电网调压特点,综合大负荷、小负荷运行方式的调压要求,兼顾事故后电压控制、空充操作和检修方式给出了变压器分接头确定的原则,最后以新疆南部电网库一阿一巴一喀输变电工程为实例,应用此原则确定其分接头位置。

1 变压器分接头确定的一般原则

1.1 电压控制目标

保证电网各母线电压在各种运行方式下均不越限是电网电压控制的目标,具体分为三个:大负荷方式下,电压不越下限;小负荷方式下,电压不越上限;检修方式和事故后电压满足《电力系统电压和无功电力技术导则》要求。

1.2 大小负荷方式控制

实际电网存在着许多电网运行方式,一般工程上只考虑电压最低和电压最高的两种运行方式,在

基金项目:国家电网公司科技项目资助(JK212015200)

这两种运行方式下的电压控制策略能够满足电压运行的要求,则认为其他方式也能满足电压控制要求。

大负荷方式下,潮流重,无功消耗最多,电压运行最低,在有无功补偿设备的基础上,应满足电压不越下限的要求;小负荷方式下,潮流轻,无功消耗最少,电压运行最高,在无无功补偿设备的基础上,应满足不越上限的要求。

1.3 事故后电压控制

重潮流下,高电压等级线路故障后引起的潮流转移会使系统消耗更多的无功,同时线路切除后系统损失了一部分有功功率,两者共同作用使无功更加缺乏,引起电压的下降;

轻潮流下,线路单侧跳闸,空充到强系统,线路首端电压合理,线路末端电压超过允许范围,空充到弱系统,线路首端近区电压大幅升高,线路末端电压更加超过允许范围。考虑着两种电压过低和过高的情况,变压器的分接头选择应尽量使其事故后电压控制措施简单^[9-10]。

1.4 检修方式

对于长链式电网中间任一线路检修,将形成剩余网络高电压等级与主网断开,网络薄弱导致短路容量降低,电压波动大控制困难。同时对于单线单变的网络,中间一台主变压器检修下,由两段长线路形成超长线路,线路沿线稳态电压可能超出运行要求范围。若发生超长线路单侧偷跳和检修主变压器的相邻主变压器跳闸,大量冗余无功下网导致严重过电压,停线操作也难以安排。分接头选择不合理易造成高电压等级电压高,导致检修方式安排困难。

1.5 合空充电压控制

当电网一端系统较弱,高电压等级线路较长时,从弱系统侧对线路进行充电操作,将引起近区母线电压大幅升高,导致操作前母线电压难以控制。在对高电压等级线路系统调试期间,需要从两侧分别对线路进行充电操作,电压控制问题更加突出。变压器的分接头若选择不合理会导致合空充电压控制困难。

2 主变压器分接头确定流程

对实际电网进行分接头选择时,在保证系统无功充裕的情况下调节分接头才能达到调压的效果,有以下几个基本步骤:

- 1) 根据两侧电压控制目标和允许运行范围,确定电压控制目标;
- 2) 大负荷和小负荷方式评估无功补偿控制策略;
- 3) 校验事故后电压:轻潮流单侧跳闸过电压、重潮流 $N-1$ 低电压;
- 4) 检修方式下电压控制措施评价;
- 5) 空充线路电压控制措施评价;
- 6) 综合大小负荷方式、事故后、检修方式和空充线路电压控制策略综合评价确定分接头位置。

3 新疆南部电网主变压器分接头确定

3.1 概述

如图 1 所示,预计 2015 年 9 月至年底,750 kV 库车—阿克苏—巴楚—喀什输变电工程投运,该工程投运后,由 750 kV 吐鲁番变电站始,至 750 kV 喀什变电站,1 000 km 750 kV 线路均为单线,与主网联系薄弱,疆南各 750 kV 变电站变压器为无载调压变压器。220 kV 侧有 5 个分接头可选择,即 $220 \text{ kV} \pm 2 \times 2.5\%$ 。

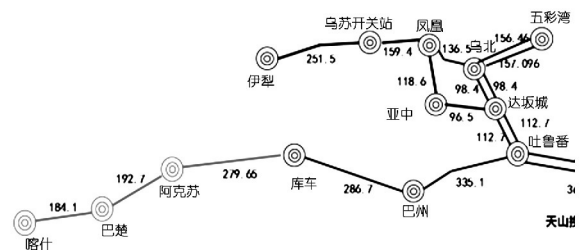


图 1 新疆 750 kV 主网架

3.2 电压控制特性分析

南疆电网线路长,潮流较轻,无功功率过剩严重,主要存在过电压问题,现通过理论分析其主要无功电压特性。表 1 为 750 kV 线路长度和补偿情况。

表 1 750 kV 线路长度和补偿情况

线路名称	长度/km	高抗补偿度
喀什—巴楚	184	80%
巴楚—阿克苏	193	77%
阿克苏—库车	280	82%
库车—巴州	287	85%

电压变化主要来自无功功率流过线路产生的压升和冗余功率注入系统造成的压升的叠加:

$$\Delta U_{\text{沿线}} = \frac{PR + QX}{U} \quad (1)$$

$$\Delta U_{\text{首端}} = \frac{\Delta Q}{S} U_0 \quad (2)$$

设线路长度为 L (百公里), 取基准容量 100 MVA, 基准电压 750 kV, 750 kV 线路百公里阻抗取 0.005 p. u., 百公里线路充电功率取 250 Mvar, 取高抗补偿度 80% (两侧各 40%), 沿线最高电压在线路的 60% 处, 忽略特高压电阻, 则

$$\Delta U_{\text{沿线}} = 750 \times \int_0^{0.6L} 2.5L \times 0.005 dL \approx 1.7 \times L^2 \text{ kV} \quad (3)$$

750 kV 线路百公里冗余无功 $250 \times 20\% = 50$ Mvar, 南疆电网线路断开后 750 kV 母线侧短路容量约为 3 000 MVA, 由于初始有部分无功下网, 因此实际小于冗余无功, 考虑最严重情况网络变化后 $\Delta Q = Q_{\text{冗余}}$ 。

$$\Delta U_{\text{首端}} \approx 50 \times L / 3\,000 \times 750 = 12.5 \times L \text{ kV} \quad (4)$$

$$\Delta U = \Delta U_{\text{首端}} + \Delta U_{\text{沿线}} = 12.5L + 1.7L^2 \text{ kV} \quad (5)$$

根据上式可知, 当线路为 200 km 时, 最严重情况下单侧跳闸可能造成 30 kV 左右压升, 如果主变压器检修方式下发生相邻主变压器跳闸或长线单侧跳闸可能造成 50 kV 的压升。

3.3 确定电压控制目标

新疆南部电网 750 kV 电压控制原则, 正常运行电压 750 ~ 800 kV, 事故后若在 800 ~ 840 kV 之间, 采取调度员手动采取措施控制, 在 840 kV 以上需安自装置快速动作恢复正常。220 kV 正常运行电压控制要求在 230 ~ 242 kV 之间, 事故后电压不低于 207 kV。南疆电网 750 kV 正常运行电压在 765 ~ 775 kV 之间, 220 kV 电压长期运行在 238 ~ 242 kV 之间, 220 kV 电压几乎没有运行裕度。

3.4 大、小负荷方式下电压评估

南疆电网 750 kV 正常运行电压在 765 ~ 775 kV 之间, 220 kV 电压长期运行在 238 ~ 242 kV 之间, 电压偏高严重。根据电网实际运行情况安排两种无功消耗最大和无功消耗最小的方式, 即大负荷和小负荷方式。表 2 为南疆电网各地州最大和最小负荷。

表 2 南疆电网负荷

负荷电源情况/MW	和田	疆南	阿克苏	巴州
最大负荷	310	1 240	1 400	1 060
最小负荷	180	660	750	800

分别在这两种方式下, 通过无功补偿装置和发

电机调节使电压调整到实际运行水平, 首先分析无功补偿投入情况, 以获得电压调节裕度。

表 3 750 kV 变电站无功补偿情况分析

750 kV 变电站	电抗配置	投入低抗	
		大负荷	小负荷
喀什	2 × 60	60	60
巴楚	2 × 60	60	2 × 60
阿克苏	2 × 60 + 45	2 × 60	2 × 60 + 45
库车	3 × 60	60	3 × 60
巴州	4 × 60	60	2 × 60

表 3 为各 750 kV 变电站在大、小负荷方式下无功补偿投入情况, 表 4 为各地州 220 kV 变电站无功补偿情况, 可知在大负荷方式下, 750 kV 变电站和 220 kV 变电站均有调压裕度。在小负荷方式下, 各 750 kV 变电站和 220 kV 变电站剩余电抗容量较低, 个别变压器和地州已无降低电压的手段, 即对于 220 kV 电压层面, 电压较高的情况控制较为困难。

表 4 220 kV 变电站无功补偿情况 (Mvar)

地区	大负荷方式		小负荷方式	
	投入电容器	剩余电容器	投入电抗器	剩余电抗器
和田	37	10	55	0
疆南	194	142	150	50
阿克苏	54	263	85	0
巴州	157	292	95	45

在当前的无功配置情况下, 220 kV 网络高电压情况是主要矛盾。因此希望通过调节变压器分接头能够降低 220 kV 电压, 同时兼顾 750 kV 电压在一个合适的范围。在其他条件都不变的情况下调整分接头 +1 挡和 +2 挡 (经初步分析其他档位不适合调压要求), 得到表 4 电压变化情况。

表 5 小负荷电压

750 kV 变电站	电压 /kV	全部 +1 挡位	全部 +2 挡位
喀什	750	759.8	775
	220	237.9	237.1
巴楚	750	762	776.6
	220	238	237
阿克苏	750	764.1	778
	220	238	236.9
库车	750	764.3	775.3
	220	238	236.6
巴州	750	768.6	773.5
	220	236.5	237.6

表 5 为小负荷方式下不同挡位电压情况, 各台

主变压器分接头调至 +1 挡后,各台变压器主变压器 750 kV 母线电压均有升高,从巴州变压器 750 kV 母线到 750 kV 线路喀什末端,电压升高幅度依次变大,升高范围在 3.8 ~ 12.6 kV 之间。各台主变压器 220 kV 侧母线电压除巴州主变压器 220 侧电压升高 0.8 kV 以外,其余均有所降低,喀什电压降低为 1.4 kV,其余在 2.2 ~ 2.4 kV 之间。

表6 大负荷电压

750 kV 变电站	电压 /kV	+1 挡位	+2 挡位
喀什	750	777.7	765.1
	220	237.1	238.5
巴楚	750	779.8	768
	220	237.5	239.7
阿克苏	750	780	769.2
	220	236.3	238.5
库车	750	777	768.4
	220	236	238.4
巴州	750	774.8	771
	220	236.8	236

大负荷方式下,无功需求最大,在此方式上校核主变压器不同分接头的适用性,表6为不同挡位电压,各台主变压器分接头调至 +1 挡后,各台变压器主变压器 750 kV 母线电压均有升高,从巴州变压器 750 kV 母线到喀什末端,电压升高幅度依次变大,升高范围在 4.9 ~ 15.2 kV 之间。各台主变压器 220 kV 侧母线电压除巴州主变压器 220 侧电压升高 1.1 kV 以外,其余均有所降低,变化范围在 0.8 ~ 1.4 kV 之间。

综合大小负荷方式电压情况分析,小负荷下 220 kV 过电压情况是主要矛盾,在 +1 挡位下 220 kV 电压能够降低 2 kV 左右,同时 750 kV 母线电压维持在 780 kV 左右,电压较为适中。

3.5 检修方式

库车主变压器检修下 750 kV 巴库一线巴侧跳闸,压升最大,表7给出检修方式下不同挡位分接头事故后电压变化情况。

表7 检修方式 N-1 后压升

变压器挡位	母线 /kV	最高电压	最大压升
+1	750	835.3	56.6
	220	249.3	10
+2	750	817.6	55
	220	246.2	9.7

主变压器检修方式下,长线路发生单侧偷跳和相邻主变压器跳闸压升较大,不同挡位最大压升相

近。相对最高电压而言都在 840 kV 以内,+2 挡位有较大电压裕度。

3.6 事故后方式电压评估

1) 事故后低电压

变压器分接头的选择对于事故后电压过低和过高情况都有一定影响,电网运行电压较低时不利于系统稳定性,变压器分接头挡位的选择应避免电网运行电压低导致稳定性下降的问题,因此事故后低电压是评估分接头合理性的一个重要方面。由上面分析可知,各分区容性无功补偿装置裕度较大,电压低不是电网运行的主要矛盾,因此本例可不用考虑事故后低电压问题。

2) 事故后过电压

南疆电网线路长,充电功率高,发生线路单侧跳闸情况易出现过电压情况。表8为小负荷方式下不同变压器挡位线路单侧偷跳的压升情况。

表8 线路单侧偷跳压升

变压器挡位	母线 /kV	最高电压	最大压升
+2	750	796.1	26.2
	220	241.1	5.1
+1	750	780.6	22.8
	220	239.6	2.6

由表8可知:+2 挡,线路单侧跳闸后多处 750 kV 电压在 790 ~ 800 kV 范围内,750 kV 母线最高电压达到 796.1 kV,最大压升 26.2 kV,对应巴库巴侧跳闸巴州电压。220 kV 母线最高电压 241.1 kV,最大压升 5.1 kV,对应库车主变压器 220 kV 电压;+1 挡,750 kV 电压最高为 780.6 kV,压升最高为 22.8 kV,对应喀什主变压器跳闸后楚喀线喀侧电压。跳闸后 220 kV 母线压升最高为 2.6 kV,对应楚喀喀侧跳闸巴楚 220 kV 电压。

按照正常运行电压 750 ~ 800 kV,事故后短时间在 800 ~ 840 kV 之间的标准,两个挡位都在要求范围内,对应 +1 挡有较大的电压控制裕度。

3.7 合空充操作电压评估

合空充线路时,为保证线路沿线电压不超过电压要求,需控制合闸侧母线的初始电压低于某值,750 kV 按不超过 800 kV 控制,不同分接头对应合空充操作时的 750 kV 变电站电压不同,不合适的分接头设置可能造成电压控制困难。表9为给出各 750 kV 变电站母线合空充母线电压控制要求。

表 9 空充电压控制分析

合闸侧	空投	电压等级 /kV	母线压升	沿线最高压差	母线控制电压
巴州	巴库线	750	12.4	11.16	776.4
		220	3.3		238.7
库车	库阿线	750	18.2	17.82	764
		220	4		238.1
阿克苏	阿楚线	750	17.4	7.74	775.2
		220	3.7		238.3
巴楚	楚喀线	750	18.8	6.3	775.1
		220	3		237

由于在无 750 kV 线路充电功率下注的情况下，通过投 750 kV 变电站低抗能够控制 220 kV 母线电压在较低水平，因此两种挡位下均可以。

3.8 分接头位置综合评估

通过大、小负荷方式、事故后、合空充操作评估了不同分接头的合理性，如表 10 所示。

表 10 分接头位置综合对比

运行方式		+1 挡/kV	+2 挡/kV
大负荷	750 kV	773 ~ 778	759 ~ 76236 ~ 238
	220 kV	236 ~ 238	较大
	升压裕度	较大	
小负荷	750 kV	774 ~ 780	765 ~ 771
	220 kV	236 ~ 238	236 ~ 240
	降压裕度	无	无
检修方式	一检一跳	最高电压 835.3， 最大压升 56.6	最高电压 817.6， 最高压升 55
事故后	过电压情况	最高电压 796.1， 最大压升 26.2	最高电压 780.6， 最高压升 22.8
	低电压情况	控制裕度较大	控制裕度较大
合空充	750 kV	764 ~ 776、控制措施较容易	
	220 kV	237 ~ 239、控制措施较容易	

综合表 10 分析，若新疆南部电网按上述控制原则，正常运行电压 750 ~ 800 kV，事故后若在 800 ~ 840 kV 之间，采取调度员手动采取措施控制到正常水平。电压在 840 kV 需配置安自装置故障后快速动作恢复正常运行电压。220 kV 正常运行电压控制要求在 230 ~ 242 kV 之间，事故后电压不低于 207 kV，则选择 +1 挡较为适合。

4 结 论

结合链式电网的特点，给出了变压器分接头的确定原则，即根据电压控制目标，考虑大、小负荷方式、事故后方式、检修方式和合空充电压控制，综合确定合理的分接头位置。将此原则应用疆南电网库—阿—巴—喀工程，所选择分接头能更好满足各种工况的电压控制要求，验证了原则的准确性。

参考文献

- [1] 谭永才. 电力系统规划设计技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 213 - 220.
- [2] 许文超, 郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 100 - 104.
- [3] 提兆旭, 龚昱, 徐剑, 等. 变压器分接头对电压稳定的影响及动作限域的构成 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(1): 20 - 23.
- [4] 李向荣. 变压器分接头与广西电网无功电压水平的关系分析 [J]. 广西电力, 2007(1): 9 - 13.
- [5] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 刘崇茹, 张伯明, 孙宏斌. 交直流系统潮流计算中换流变压器分接头的调整方法 [J]. 电网技术, 2006, 30(9): 22 - 27.
- [7] 陈添福. 确定三绕组变压器电压分接头档位的算法及其在区域电网电压调整中的应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(1): 57 - 60.
- [8] 杨华, 王良. 变压器分接头位置的估计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(3): 61 - 63.
- [9] 刘明松, 张健, 张文朝. 弱电磁环网运行控制若干问题及对策 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 109 - 114.
- [10] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵, 等. 电磁环网条件下西北 750 kV 电网运行方式的研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(1): 33 - 38.

作者简介:

朱国平(1985), 助理工程师, 研究方向为电力系统及继电保护;

彭龙(1988), 助理工程师, 研究方向为电网运行与控制。

(收稿日期: 2015 - 10 - 28)