

500 kV 线路并联高抗退运对电网影响及措施分析

程思萌¹,汪亚茜²,龙鑫³,周煦光¹,戈田平¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 国网江西省电力有限公司超高压分公司, 江西 南昌 330096; 3. 国网江西省电力有限公司宜春供电分公司, 江西 宜春 336000)

摘 要:500 kV 线路并联高抗是接在高压输电线路上的大容量电感线圈, 用来补偿高压输电线路的电容和吸收无功功率, 防止电网轻负荷时因容性功率过多引起电压升高。文中介绍了并联高抗的作用及抑制过电压的原理, 基于 PSASP 仿真软件, 以实际厂站算例进行仿真计算, 从暂态稳定和过电压两个方面对 500 kV 线路并联高抗退运后电网运行风险进行分析, 并提出防范过电压的措施及建议。

关键词:并联高抗; 吸收无功; 暂态稳定; 过电压

中图分类号:TM 472 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)03-0066-04

0 引言

随着电力系统的发展步伐, 输电线路的电压等级和距离不断提高, 引起系统电容电流以及容性无功的增长, 导致电网电压偏高, 因此长距离线路通常会配置并联电抗器(高抗)来补偿电容电流。

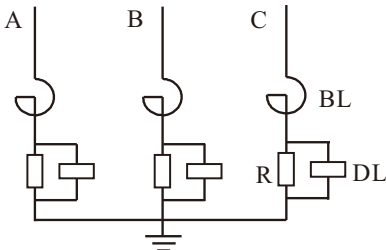
高抗对于抑制潜供电流、降低工频和操作过电压具有重要作用^[1-3], 配置高抗可以大幅提升线路输电能力和系统稳定性, 但同时也造成了电压特性的变化^[4-5]。高抗发生故障时, 更换高抗需相应将其所在线路退出运行, 会影响电网的正常稳定运行。高抗所在线路恢复运后, 在无高抗的情况下, 系统的暂稳水平、过电压、线路输电能力都将面临严峻的挑战^[6]。

因此, 文中以江西电网某回 500 kV 线路为研究算例, 在线路高抗退运后, 基于 PSASP 仿真软件, 对电网的暂态稳定水平、暂态过电压、稳态过电压情况进行仿真分析, 并针对过电压问题提出相关措施及建议, 对实际运行时出现高抗临时投退的过电压分析具有一定的参考意义。

1 并联高抗的作用及抑制过电压原理

1.1 并联高抗的作用

并联电抗器的结构如图 1 所示。



BL: 避雷器 R: 电阻 DL: 断路器

图 1 并联电抗器结构图

并联电抗器对于改善电力系统运行状况的作用主要有以下几项^[7-8]:

- 1) 削弱空载或轻载线路的容性效应, 降低工频过电压, 抑制操作过电压幅值;
- 2) 补偿线路对地电纳, 减小与系统外的无功交换, 提高电网稳定性及输电能力;
- 3) 优化无功分布, 降低线路损耗, 提高送电效率;

收稿日期: 2026-01-29

基金项目: 国网公司框架项目(521820240028)。

作者简介: 程思萌(1992), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定运行。

4) 降低机组高压母线的工频稳态电压,有利于发电机同期并列;

5) 抑制同步发电机带空载长线路发生自励磁谐振;

6) 降低负荷节点电压对主变变比和机组电压变化的敏感度。

1.2 并联高抗抑制过电压原理

输电线路用 Π 型等值电路表示(如图2所示),线路长度为 l ; R 、 L 、 C 分别为电阻、电感、电容; U_1 、 U_2 分别为首端、末端电压; I 为线路电流^[9-10]。

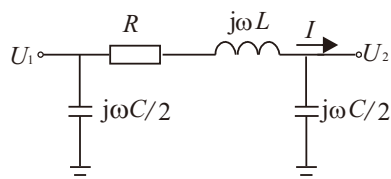


图2 输电线路的 Π 型等值电路

假设线路为无损线路(忽略线路的电阻和电导),距离末端 l 处的线路电压为:

$$U(l)=U_2\cos(\beta l)+jZ_c I\sin(\beta l) \quad (1)$$

其中, $\beta = \omega\sqrt{LC}$ 是相位常数; $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 是波阻抗(特征阻抗)。

在线路空载时,线路电流 $I=0$,

$$U(l)=U_2\cos(\beta l) \quad (2)$$

因此,线路首端电压 $U_1=U_2\cos(\beta l)$

可得末端电压:

$$U_2 = \frac{U_1}{\cos(\beta l)} \quad (3)$$

输电线路越长, βl 越大,线路末端电压 U_2 越高;为限制长距离输电线路产生的这种过电压现象,大多采用装设并联高抗的措施。

装设并联高抗前,系统对地阻抗主要是容抗,非常大;装设并联高抗后,相当于感抗与容抗并联,高抗的感性电流与容抗的容性电流相位相反,能有效补偿电容耦合效应,抑制线路末端电压的升高。

2 并联高抗退运后仿真分析

江西电网 500 kV AB 线路长度 161 km, 型号 $4 \times \text{JL1/LHA1-465/210}$, B 侧配有一组 120 Mvar 并联高抗, 线路及周边网架结构图如图3所示。

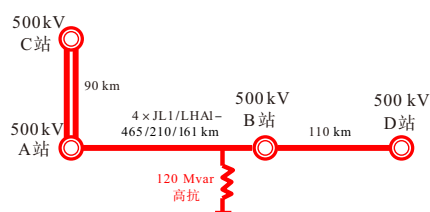


图3 AB线路近区网架结构图

由于该高抗存在绝缘放电风险,需进行更换,现基于PSASP仿真软件对AB线路B侧高抗退运后电网暂态稳定和过电压情况进行对比分析。

2.1 暂态稳定分析

基于江西电网当前负荷水平,全网 500 kV 电压维持在 525 kV 左右,在 AB 线路 B 侧高抗退出和投入两种情况下,对江西电网 500 kV 同杆并架线路 N-2 制约故障 1 和高抗所在地区的 500 kV 线路 N-1 制约故障 2 进行暂稳扫描,故障后换流站母线电压曲线如图4—5所示(蓝色曲线为高抗投入,绿色曲线为高抗退出):

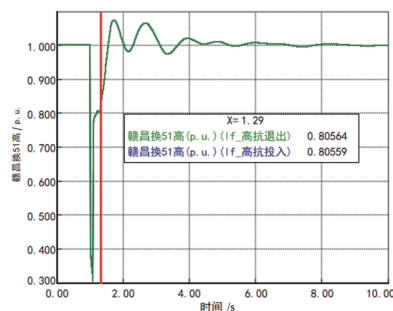


图4 江西电网 N-2 制约故障 1 后换流站母线电压对比曲线

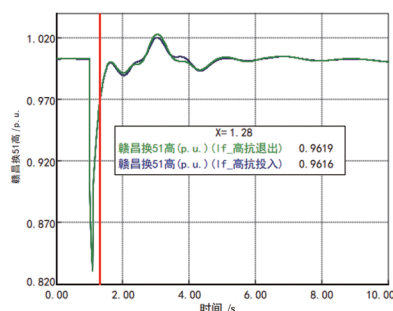


图5 所在地区 N-1 制约故障 2 后换流站母线电压对比曲线

由图4—5曲线可以明显看出,AB线路在B侧高抗退出和投入两种情况下,江西电网整体特性和高抗所在地区暂稳特性基本保持一致,因此,高抗退出对电网暂稳特性没有较大影响。

2.2 过电压分析

《电力系统电压和无功电力技术导则》(GB/T 40427—2021)中“5.2 母线电压运行偏差”要求:330 kV/

500 kV 母线正常运行时,最高运行电压不应超过系统标称电压的+10%,最低运行电压不应影响电力系统同步稳定、电压稳定、厂用电的正常使用及下一级电压的调节;事故运行方式时,电压运行偏差为系统标称电压的-5%~10%^[11]。

2.2.1 暂态过电压分析

500 kV AB 线路 B 侧高抗退运后,AB 线路两侧分别发生三相永久性 N-1 故障和单相瞬时性 N-1 故障,AB 线路近区 500 kV 母线电压曲线如图 6—9 所示。

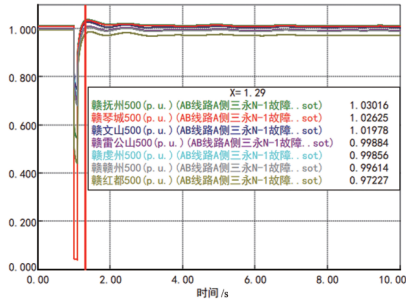


图 6 AB 线路 A 侧三相永久性 N-1 故障后电压曲线

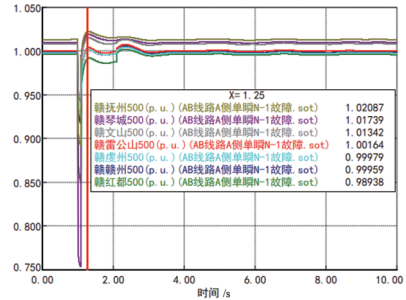


图 7 AB 线路 A 侧单相瞬时性 N-1 故障后电压曲线

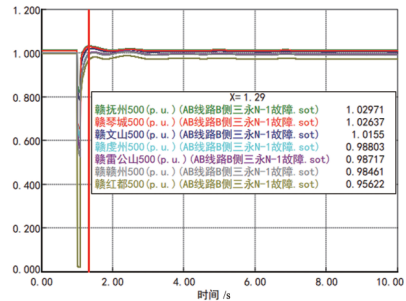


图 8 AB 线路 B 侧三相永久性 N-1 故障后电压曲线

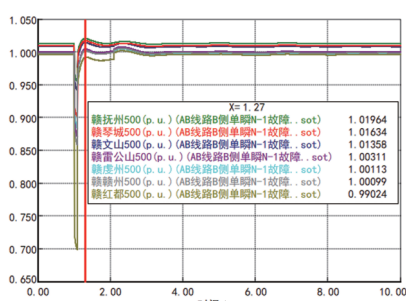


图 9 AB 线路 B 侧单相瞬时性 N-1 故障后电压曲线

由图 6—9 曲线可以明显看出,高抗退出后,AB 线路两侧发生三相永久性 N-1 故障和单相瞬时性 N-1 故障后 AB 线路近区 500 kV 最大母线电压最高为 1.03 p.u.(折算成有名值为 541 kV),未超过系统标称电压(500 kV)的 10%,因此,AB 线路 B 侧高抗退出后不存在暂态过电压问题。

2.2.2 稳态过电压分析

在正常方式下,将 500 kV AB 线路两侧厂站母线初始电压调至 535 kV 左右,潮流图如图 10 所示。

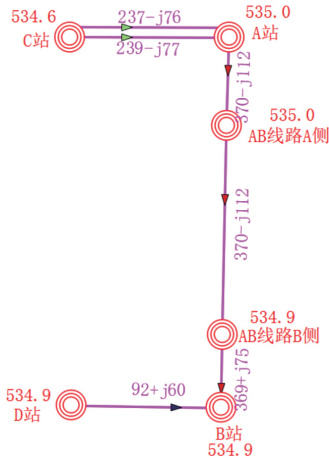


图 10 正常情况 AB 线路初始电压 535 kV

1) AB 线路 A 侧开关无故障跳开后,AB 线路 A 侧母线电压由 535 kV 增至 550 kV(增幅 15 kV),达到系统标称电压的 10%,潮流图如图 11 所示。

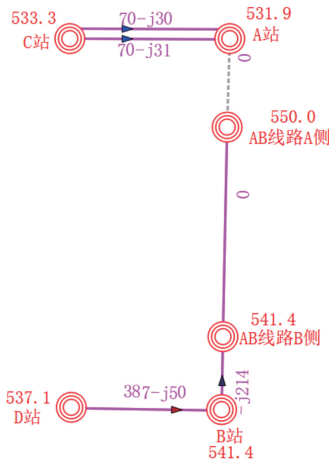


图 11 AB 线路 A 侧开关跳开后电压情况

2) AB 线路 B 侧开关无故障跳开后,AB 线路 B 侧母线电压由 534.9 kV 增至 547.6 kV(增幅 12.7 kV),未超过系统标称电压的 10%,潮流图如图 12 所示。

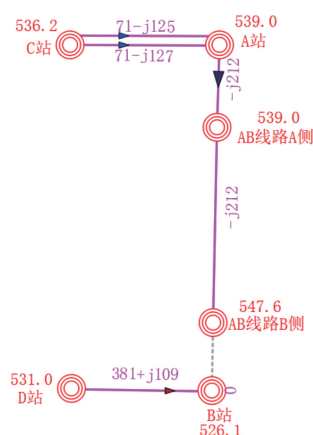


图 12 AB 线路 B 侧开关跳开后电压情况

综上所述,AB 线路两侧开关无故障跳开后线路末端电压情况如表 1 所示。

表 1 AB 线路两侧开关跳开后电压情况

	初始电压	AB 线路 A 侧开关跳开	AB 线路 B 侧开关跳开
A 站 500 kV 母线	535	-	539.0
AB 线路 A 侧电压	535	550.0	539.0
AB 线路 B 侧电压	534.9	541.4	547.6
B 站 500 kV 母线	534.9	541.1	-

由以上分析可知,AB 线路 A 侧开关无故障跳开后,AB 线路 A 侧电压由 535 kV 增至 550 kV(增幅 15 kV);AB 线路 B 侧开关故障跳开后,AB 线 B 侧电压由 534.9 kV 增至 547.6 kV(增幅 12.7 kV)。因此,AB 线路 A 侧开关无故障跳开比更 B 侧开关跳开的情况严重,存在空充过电压风险,需采取过电压抑制措施。

3 抑制过电压措施分析

3.1 高抗退出运行

由 2.2.2 小节分析可知,高抗退出运行后,若该线路发生无故障跳开,由于长线路空充,末端会产生较高过电压,存在过电压风险,需采取预控措施。若调整 500 kV AB 线路两侧厂站母线初始电压,以下三种初始电压情况下,AB 线路 A 侧开关无故障跳开末端电压情况如表 2 所示。

表 2 不同初始电压,AB 线路 A 侧开关跳开后电压情况

	初始电压 530	初始电压 535	初始电压 540
	初始 A 侧开关跳开	初始 A 侧开关跳开	初始 A 侧开关跳开
A 站 500 kV 母线	530.6	535	540.1
AB 线路 A 侧电压	530.6	543.5	550.0
AB 线路 B 侧电压	529.9	534.9	541.4
B 站 500 kV 母线	529.9	535.0	541.1

由表 2 可知:1) AB 线路两侧厂站母线初始电压

越高,A 侧开关跳开后线路末端电压越高,电压增幅也越大;2) 若 AB 线路两侧厂站母线初始电压降至 530 kV 左右时,A 侧开关跳开后线路末端电压达 543.5 kV,未超过系统标称电压的 10%。

因此,在高抗退出运行时,可通过控制线路近区厂站 500 kV 母线初始电压,降低线路两侧开关无故障跳开产生的空充过电压,500 kV 母线初始电压不超过 535 kV。

3.2 高抗恢复运行

若恢复 AB 线路 B 侧高抗,500 kV AB 线路两侧厂站母线初始电压为 535 kV 左右,AB 线路两侧开关无故障跳开后,线路末端电压情况如表 3 所示。

表 3 恢复高抗后,AB 线路两侧开关跳开后电压情况

	初始电压	AB 线路 A 侧开关跳开	AB 线路 B 侧开关跳开
A 站 500 kV 母线	535	-	534.6
AB 线路 A 侧电压	535	549.9	534.6
AB 线路 B 侧电压	534.9	541.4	532.9
B 站 500 kV 母线	534.9	541.4	-

由表 3 可知,AB 线路 B 侧高抗恢复运行后,AB 线路 A 侧开关跳开后,AB 线路 A 侧电压由 535 kV 增长至 549.9 kV(增幅 14.9 kV),接近系统标称电压的 10%;AB 线路 B 侧开关跳开后,AB 线路 B 侧电压由 534.9 kV 降至 532.9 kV(降幅 2 kV)。

因此,为防止带高抗线路产生空充过电压,线路停电时,建议先拉停线路高抗侧开关,后拉停无高抗侧开关;反之,线路充电时,先恢复无高抗侧开关,后恢复线路高抗侧开关。

4 结语

文中首先对并联高抗的作用及其抑制过电压的原理进行了介绍,然后以江西电网某回单侧配置了并联电抗的 500 kV 线路为研究算例,基于 PSASP 仿真软件,在线路高抗退运后,对电网的暂态稳定水平、暂态过电压、稳态过电压状态进行仿真分析,最后在高抗退运和恢复运行两种情况下,针对过电压问题提出相关措施及建议。主要结论如下:

1) 线路高抗退运对电网全局暂态稳定水平,对线路所在地区的局部电网暂态稳定水平均没有明显影响。
(下转第 94 页)

稳定约束的源网荷储一体化系统储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2025, 40(07): 2146-2161.

[8] 王伟, 周少泽, 黄萌, 等. 构网型技术: 演进历程、功能定位与应用展望[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(01): 1-13.

[9] Xiong Xiaoling, Li Xinyue, Luo Bochen, et al. An additional damping torque method for low-frequency stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 15858-15869.

[10] Du W, Fu Q, Wang H F. Power system small-signal angular stability affected by virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(04): 3209-3219.

[11] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(02): 451-458.

[12] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(04): 137-144.

[13] Yu Y, Chaudhary S K, Tinajero G D A, et al. a reference-

feedforward-based damping method for virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2022, 37(07): 7566-7571.

[14] Yang M, Wang Y, Chen S, et al. Comparative studies on damping control strategies for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 39(02): 859-873.

[15] Wang Z, Chen Y, Li X, et al. Active power oscillation suppression based on decentralized transient dam control for parallel virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(04): 2582-2592.

[16] 江世明, 唐杰. 基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 144-154.

[17] Li M, Yu P, Hu W, et al. Phase feedforward damping control method for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2022, 37(08): 9790-9806.

[18] 苗长新, 赵文鹏, 刘家明, 等. 基于频率超前校正的 VSG 并联系统有功振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 24-35.

(上接第 69 页)

2) 线路高抗退运后, 线路发生三相永信性 N-1 故障和单相瞬时性 N-1 故障后近区 500 kV 最大母线电压最高不超过标称电压的 10%, 不存在暂态过电压问题。

3) 线路高抗退运后, 两侧开关无故障跳开后, 由于长线路空充, 末端会产生较高过电压, 且线路无高抗侧开关跳开的情况更为严重; 由于线路近区母线初始电压越高, 空充过电压越高。因此, 可通过控制线路近区厂站 500 kV 母线初始电压降低开关无故障跳开产生的空充电电压, 建议初始电压不超过 535 kV。

4) 配置线路高抗是抑制空充过高压的有效手段, 为防止单侧有高抗的线路产生空充过电压, 建议线路停电时先拉停线路高抗侧开关, 后拉停无高抗侧开关; 充电时, 先恢复无高抗侧开关, 后恢复线路高抗侧开关。

参考文献:

[1] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技

术, 2005, 29(03): 1-4.

[2] 李志刚, 杨林, 项力恒, 等. 750 kV 输变电示范工程设计特点[J]. 中国电力, 2005, 12(38): 6-11.

[3] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

[4] 毕天姝, 郑彬, 班连庚, 等. 特高压远距离高补偿度串补线路故障清除操作过电压特性及对策[J]. 电网技术, 2016, 40(07): 1943-1950.

[5] 姚兆民, 程艾生, 郭建伟. 500 kV 线路串补旁路隔离开关与线路高抗隔离开关的操作顺序分析[J]. 科技情报开发与经济, 2012, 22(08): 155-157.

[6] 侯有韬, 杨蕾, 向川, 等. 500 kV 输电线路高抗和串补对过电压影响分析[J]. 云南电力技术, 2020, 48(01): 35-38.

[7] 徐铭, 吴桂媛, 徐旭, 等. 并联高压电抗器对超高压及特高压系统运行性能的影响[J]. 甘肃科技, 2009, 25(02): 62-64.

[8] 史林雳. 高压线路并联电抗补偿特性及分析[J]. 电气工程与自动化, 2010, 24(04): 63, 65.

[9] 何仰赞. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

[10] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[11] 国家市场监督管理总局. 电力系统电压和无功电力技术导则: GB/T 40427—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.