

超/特高压交流输电线路断路器 合闸电阻的适用性研究

计荣荣¹, 易强¹, 苏菲¹, 孙可², 陈稼苗³, 周浩¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027; 2. 浙江省电力公司, 浙江省 杭州市 310007;
3. 浙江省电力设计院, 浙江省 杭州市 310012)

Study on Applicability of Circuit Breaker Closing Resistance in EHV and UHV AC Systems

Ji Rongrong¹, Yi Qiang¹, Su Fei¹, Sun Ke², Chen Jiamiao³, Zhou Hao¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;
2. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China;
3. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Closing resistors can effectively restrict switching surges due to closing no load transmission lines of EHV and/or UHV AC power grids. In view of complex structure and high cost of closing resistors, it is worthy to research that whether there is the necessity to adopt this measure or not. By use of software simulation, the applicability of closing resistors in EHV and UHV AC power grids under different conditions is researched. Research results show that for 500 kV AC power grid the closing resistor can usually be not equipped while the length of transmission line is short than 100 km; whether closing resistor has to be equipped or not should be determined according to the analysis results based on concrete conditions while the length of transmission line is within the range from 100 km to 200 km; the closing resistor should be adopted in general while the length of transmission line is within the range from 200 km to 400 km, however, the way of configuring two or three sets of metal oxide arrester (MOA) along the transmission line to substitute for closing resistors could be adopted; the closing resistors should be still equipped to restrict switching surge while the length of transmission line is within the range from 400 km to 600 km. As for 1000 kV AC power grid, it is hardly to restrict the switching surge due to closing no-load line to the specified value given by the code even though the length of transmission line is 100 km when closing resistors are not adopted. Thus, in general closing resistors should be configured in 1000 kV transmission lines, and it is better to adopt closing resistors with low resistance values for longer transmission lines and that with

high resistance values for shorter transmission line.

KEY WORDS: extra high voltage (EHV); ultra high voltage (UHV); switching surge due to closing no-load line; closing resistor; metal oxide arrester (MOA)

摘要: 断路器合闸电阻能较好地限制超高压与特高压交流系统合闸过电压, 但因其结构复杂、成本高等缺点, 故是否有必要采取该措施值得研究。作者采用软件仿真技术, 探讨了不同情况下超高压与特高压交流系统合闸电阻的适用问题。研究表明, 对于 500 kV 交流系统, 当线路长度在 100 km 以下时, 通常可以取消合闸电阻; 当长度在 100~200 km 时, 需根据具体情况进行分析确定是否有必要采用合闸电阻; 当长度在 200~400 km 时, 一般应采用合闸电阻, 但也可采取在沿线布置 2~3 组避雷器的方法来替代合闸电阻; 当长度在 400~600 km 时, 仍应采用合闸电阻限制合空线过电压。对于 1 000 kV 交流系统, 即使是 100 km 的短线路, 若不采用合闸电阻就难以将合闸过电压限制在规程规定的范围内。因此, 1 000 kV 交流系统通常应采用合闸电阻, 且较长线路宜采用较低阻值, 较短线路宜采用较高阻值。

关键词: 超高压; 特高压; 合空线过电压; 合闸电阻; 避雷器

0 引言

超高压与特高压交流系统的操作过电压幅值是确定系统绝缘水平的主要因素, 直接影响到系统的绝缘成本, 故操作过电压问题是超/特高压线路建设发展中的重要研究课题之一^[1-3]; 而合闸过电压是其中最为重要的过电压, 也是超/特高压交流系统操作过电压水平的决定性因素。在超/特高压交流电网中, 从控制过电压的角度考虑, 通常采用单相重合闸方式。故合闸过电压主要有合空线过电压和单相

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2011CB-209405)。

The National Basic Research Program of China(973 Program)
(2011CB209405).

重合闸过电压 2 种^[4-5], 其中, 合空线过电压由于综合了合闸瞬间的剧烈暂态过程、线路的容升效应以及合闸时三相不同期等因素, 其危害更为严重, 在无限措施时过电压幅值可达 2.0 pu 或以上, 超出规程中超/特高压系统操作过电压允许值分别不应大于 2.0 pu 和 1.7 pu 的规定^[6-7]。所以, 合理有效地限制合空线过电压是操作过电压问题研究中的重点。目前, 通常采用合闸电阻来限制合空线过电压^[8-9]; 另外, 也有文献报道了采用避雷器代替合闸电阻来限制该过电压的研究成果^[10-13]。

一般来说, 安装有合闸电阻的断路器由于结构复杂更容易发生事故, 存在一定的安全隐患。实际上, 即使在不采用合闸电阻的情况下, 合空线过电压幅值也多在 2.0 pu 附近, 考虑到 500 kV 交流系统的限制允许值为 2.0 pu, 且我国 500 kV 线路有向短距离输电的趋势, 线路容升效应低, 因此, 在线路两端避雷器的保护下, 该过电压也有可能满足 500 kV 系统规程的限制要求。事实上, 国内外已有部分线路取消了合闸电阻运行, 也未发生过由此引起的过电压超标问题。因此, 取消合闸电阻运行具有现实的可行性。目前, 公开发表的文献中有关合闸电阻的问题偏于定性分析, 迄今尚未有研究明确提出何种长度范围内 500 kV 系统可取消合闸电阻的定量结论。本文着重对超高压与特高压交流输电线路断路器合闸电阻进行定量研究, 从合空线过电压的限制角度出发, 采用软件仿真技术, 探讨 500 kV 系统中合闸电阻的适用问题, 给出了可以取消合闸电阻的线路长度的定量范围, 可供工程实践提供参考。此外, 还对特高压系统取消合闸电阻的可行性进行了研究, 结果表明, 特高压系统由于操作过电压限制允许值降为 1.7 pu, 限制难度大大增加, 且线路通常较长, 容升效应大, 仅采用避雷器限制难以满足要求, 故通常需采用合闸电阻^[14-16]。

1 500 kV 交流线路分析

1.1 仿真模型

三相合空线过电压模型如图 1 所示, 由电源、

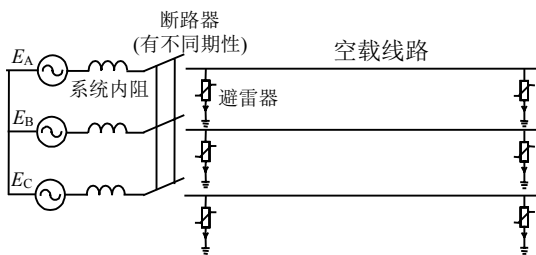


图 1 合空线过电压仿真模型
Fig. 1 A model to simulate switching surge due to closing no-load line

不同期性断路器、空载线路和避雷器等组成。在仿真 500 kV 与 1 000 kV 线路时, 因不同电压等级线路采用不同的杆塔和导线, 模型的参数必须进行调整, 但模型的结构不变。

1.2 避雷器参数

本 500 kV 线路仿真模型采用规程中典型的 500 kV 线路型避雷器, 具体参数如表 1 所示^[17]。

表 1 500 kV 交流系统避雷器典型特性参数
Tab. 1 Typical characteristic parameters of MOA adopted in 500 kV AC system

| 额定电压/kV | 持续运行电压/kV | 直流 1mA 参考电压 (峰值)/kV | 操作冲击残压 (峰值)/kV | 雷电冲击残压 (峰值)/kV |
|---------|-----------|---------------------|----------------|----------------|
| 444 | 324 | 597 | 907 | 1 106 |

1.3 线路参数

我国目前 500 kV 交流线路所用导线和杆塔种类较多, 对合空线过电压可能会产生影响。下面针对常用的几种导线和杆塔型号, 计算分析它们对过电压幅值的影响程度。为保证其他条件一致, 计算时仅改变导线或杆塔参数, 结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同导线型号对合空线过电压的影响
Tab. 2 Influences of different types of conductors on switching surge due to closing no-load line

| 常用导线规格 | 外径/mm | 直流电阻/(Ω·km ⁻¹) | 过电压/pu |
|------------|-------|----------------------------|--------|
| LGJ-400/35 | 26.82 | 0.073 89 | 1.908 |
| LGJ-400/50 | 27.63 | 0.072 32 | 1.902 |
| LGJ-500/35 | 30.00 | 0.058 12 | 1.909 |
| LGJ-500/45 | 30.00 | 0.059 12 | 1.909 |
| LGJ-630/45 | 33.60 | 0.046 33 | 1.910 |

表 3 不同类型杆塔对合空线过电压的影响
Tab. 3 Influences of different types of towers on switching surge due to closing no-load line

| 常用杆塔规格 | 呼高/m | 相邻两相水平间距/m | 中、边相垂直间距/m | 过电压/pu |
|---------|------|------------|------------|--------|
| 猫头塔 ZM1 | 36.0 | 7.50 | 9.00 | 1.908 |
| 猫头塔 ZM2 | 39.0 | 8.00 | 9.30 | 1.905 |
| 猫头塔 ZM3 | 42.0 | 8.75 | 11.25 | 1.903 |
| 酒杯塔 ZB1 | 42.0 | 11.00 | 0.00 | 1.905 |
| 酒杯塔 ZB2 | 48.0 | 11.60 | 0.00 | 1.904 |
| 酒杯塔 ZB3 | 48.0 | 12.00 | 0.00 | 1.902 |

计算结果表明, 导线型号和杆塔参数的差异对合空线过电压影响都很小, 前者最大相差仅为 0.008 pu, 后者仅为 0.006 pu, 对计算结果不会产生本质影响, 均可忽略不计。

本研究中, 采用的导线型号为钢芯铝绞线 4×LGJ-400/35, 其分裂间距为 450 mm; 线路杆塔采用 ZM1 型号的猫头塔。此类导线和杆塔及其参数已广泛应用于我国 500 kV 系统的典型设计^[18]。

1.4 系统条件

影响合空线过电压的系统条件主要有合闸端母线电压、三相不同期性和系统内阻。在本研究中,这3个参数按能产生最严重的合空线过电压条件选取。

1) 母线电压是电网过电压幅值的基础,电压等级越高,过电压绝对值越大。故电力系统中,为保持电网的安全稳定,各节点电压通常被强制控制在一定范围内。为从严考虑起见,计算中将母线电压设定为最高线电压即 550 kV。

2) 三相不同期性是指合空线时断路器的每一相在收到合闸信号后进行合闸的实际时刻之间存在一定的差异。模拟试验和仿真研究表明,三相不同期性使合空线过电压趋于严重,过电压幅值可增加 10%~30%,而不同期性的差异则对过电压影响较小。500 kV 断路器的不同期性较大的可达 10 ms^[19],本文选取此值进行计算。

3) 系统内阻指等效后电源的正序阻抗,包括电阻和电感 2 部分。电阻性越强,对过电压的阻尼作用越大,则过电压越小;电感性越强,暂态过程越激烈,则过电压越高。考虑到 500 kV 实际系统等效后正序阻抗中通常具有一定的电阻,文献指出其正序阻抗角一般不超过 86°。阻抗角越大,电阻性越弱,电感性越强,过电压就越高,为从严考虑,本文选取正序阻抗角为 88°,可认为该情况下过电压比实际系统更为严重。

资料表明,目前我国 500 kV 系统的短路电流通常都在 12.5~75 kA 范围之内^[2],由短路电流计算公式可得出系统的等效正序阻抗范围约在 3~24 Ω 之间。可认为,此范围几乎包括了所有 500 kV 系统的等效内阻。本文以长度为 100 km 的 500 kV 线路为例研究了系统内阻对合空线过电压的影响,结果如表 4 所示。

表 4 500 kV 系统内阻对合空线过电压的影响
Tab. 4 Influences of equivalent positive-sequence impedance of 500 kV power grid on switching surge due to closing no-load line

| 系统内阻/Ω | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 过电压/pu | 1.774 | 1.757 | 1.776 | 1.762 | 1.766 | 1.752 |

由表 4 可知,随着系统内阻的增大,过电压变化无明显规律,这种现象的产生是因为此时电阻和电感部分均随内阻增大而增大,而它们对过电压的影响趋势则相反。由于上述范围内系统内阻对该过电压影响较小,仅在 0.03 pu 以内,对计算结果不会产生本质影响,下文计算中采用内阻为 10 Ω 的典型值。

1.5 过电压研究

1.5.1 高抗补偿度分析

由于无功稳定的需要,超高压交流线路往往加装高抗进行补偿。作为对工频过电压的限制措施,高抗对线路操作过电压具有一定的抑制作用。鉴于目前 500 kV 系统中,长度小于 100 km 的短距离输电线路较多,故以长度为 100 km 的 500 kV 线路为例,研究高抗补偿度对合空线过电压的影响,结果如表 5 所示。

表 5 长度为 100 km 的 500 kV 有高抗补偿线路的合空线过电压

Tab. 5 Switching surge due to closing no-load shunt reactor-equipped 500 kV line with length of 100 km

| 补偿度/% | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 过电压/pu | 1.908 | 1.906 | 1.905 | 1.903 | 1.902 | 1.902 |

由表 5 可见,增大高抗补偿度能使合空线过电压有所下降,但下降幅度较小;当线路长度更长时,下降幅度略有增加。所以,高抗对合空线过电压有一定的限制作用,但总体上来说作用不大。

为从严考虑,以下研究中不采用高抗补偿措施。

1.5.2 线路长度分析

线路长度是操作过电压的一个主要影响因素,其严重性主要体现为容升效应^[20]。对于合空线过电压而言,若无线路容升效应和三相不同期性的影响,即使在无任何限制措施下,该过电压理论最大值也仅为 2.0 pu,且由于线路损耗等作用,实际值小于 2.0 pu。在 500 kV 系统中,线路两端通常加装避雷器进行防护,故该过电压一般不超过 2.0 pu,已满足限制要求。但若在长线路容升效应较为显著的情况下,则可能超出限制要求。图 2 为实测的某 500 kV 线路的容升效应曲线。

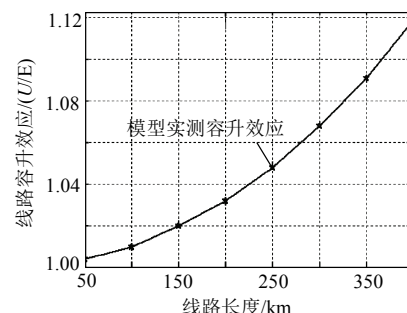


图 2 实测的某 500 kV 线路容升效应

Fig. 2 Measured voltage rise caused by distributed capacitance of a certain 500 kV transmission line

由结果可知,容升效应的严重性随线路长度的增加按指数规律上升,线路越长,其效果越明显。根据合闸过电压最大幅值的估算公式^[1](即 $U_{\text{MAX}} = 2U_{\text{steady}} - U_{\text{inc}}$),合闸后的稳态值(即计入容升效

应后的稳态电压)越高, 暂态过程中的振荡就越剧烈, 产生的过电压峰值也越高。

因此, 由于容升效应的影响, 较短线路的合闸过电压较易被限制, 而较长线路则较难。

对不同长度线路的合闸过电压进行计算分析, 结果如图 3 所示。

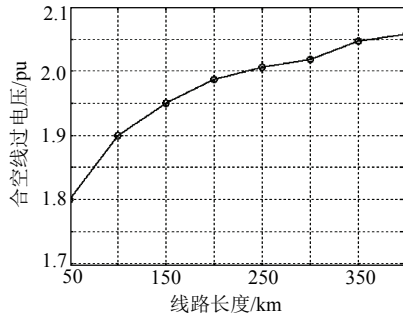


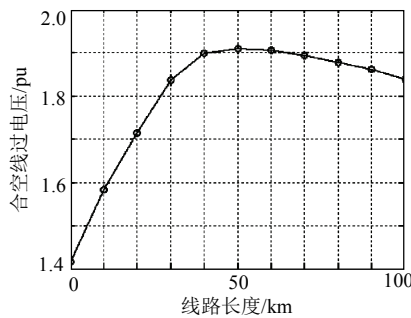
图 3 不同线路长度下合空线过电压幅值

Fig. 3 Amplitudes of switching surges due to closing transmission lines with different lengths

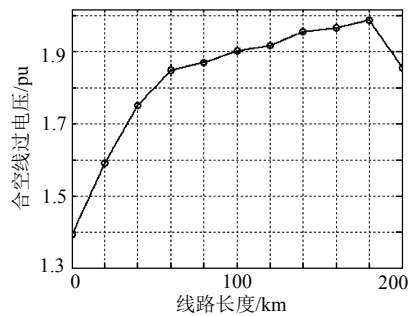
由图 3 可见, 合闸过电压幅值随线路长度的增加而明显上升, 线路长度在 200 km 以下的合空线过电压尚未超过规程规定的 2.0 pu, 而线路长度在 300 km 以上时则超出了规程的规定要求。

1.5.3 短线路过电压分析

在本文 1.4 节给定的“严酷”条件下且不采用合闸电阻时, 计算长度分别为 100 km 和 200 km 的 500 kV 线路沿线的合空线过电压分布, 结果如图 4 所示。



(a) 长 100 km 的 500 kV 线路的合空线过电压沿线分布



(b) 长 200 km 的 500 kV 线路的合空线过电压沿线分布

图 4 500 kV 短线路的合空线过电压

Fig. 4 Switching surges due to closing no-load transmission lines with short length respectively

由计算可得出如下结果:

1) 线路长度为 100 km 时, 合空线过电压最大仅为 1.91 pu, 此值低于规程中规定的数值 2.0 pu, 已被控制在要求范围内且具有一定的裕度。考虑到合空线过电压因容升效应随线路长度的增加而上升, 可以认为, 即使在最为苛刻的系统条件下且不采用合闸电阻限制时, 长度为 100 km 及以下线路的合空线过电压值也不会超出规程规定的范围。

2) 线路长度为 200 km 时, 合空线过电压最大为 1.98 pu, 较接近于 2.0 pu。考虑到计算条件较为严酷, 可认为, 长度在 100~200 km 范围内的合空线过电压一般也不超出规程规定的范围, 但裕度很小。为谨慎起见, 建设这些线路时, 宜对线路实际情况进行计算验证以确认合闸电阻可否取消。

当线路长度更长时, 合空线过电压可能会超过 2.0 pu, 此时需要采用其他措施加以限制该过电压。

1.5.4 长线路过电压分析

对于长度为 200~400 km 的较长线路, 由于此时的容升效应已较为明显, 需要通过配置合闸电阻予以限制, 也可采用沿线布置多组避雷器的措施。下面选择长度为 400 km 的较长线路, 在本文 1.4 节规定的苛刻条件下进行计算, 结果如图 5 及图 6 所示。

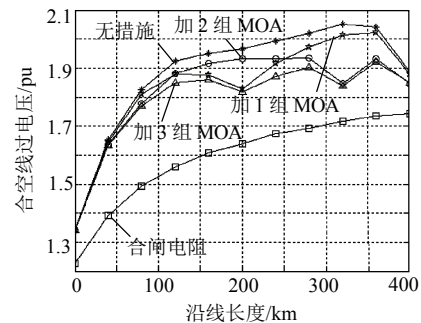


图 5 长度为 400 km 的 500 kV 线路配置合闸电阻或多组避雷器时的合空线过电压

Fig. 5 Switching surge due to closing no-load 500 kV transmission line with length of 400 km and equipped with closing resistor or multi-sets of MOA

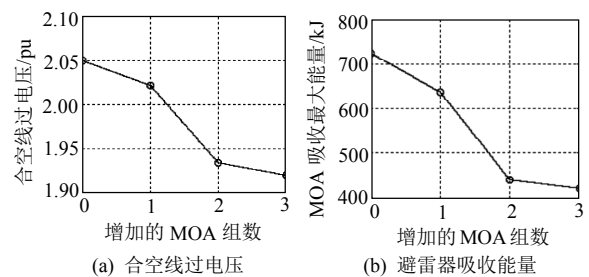


图 6 多组避雷器下最大的合空线过电压和避雷器吸收能量

Fig. 6 The maximum switching surge due to closing no-load 500 kV transmission line equipped with multi-sets of MOA and the energy absorbed by MOA

图 5 中:“无措施”即线路两端分别自带有 1 组避雷器;“加 1 组避雷器”时,线路中点另置 1 组避雷器;“加 2 组避雷器”时,增加的避雷器分别置于线路长度的 1/5 和 4/5 处;“加 3 组避雷器”时,增加的避雷器分别置于线路中点及线路长度的 1/5 和 4/5 处。

计算结果表明,长度为 400 km 的线路,采用合闸电阻后合空线过电压幅值降为 1.75 pu < 2.0 pu, 满足规程要求;也可采用在沿线增加 2~3 组避雷器将合空线过电压限制为规程允许范围内的 1.93 pu。考虑到线路有两端分别合闸的可能性,多组避雷器应对称分布。因此,长度为 200~400 km 的 500 kV 线路,采用合闸电阻或多组避雷器后,合空线过电压可以被限制在规程规定的范围内。

采用多组避雷器时,可改善过电压分布,降低最大过电压值,见图 6。合空线过电压从“无措施”时的 2.05 pu 降至“加 3 组避雷器”后的 1.93 pu;从避雷器通流容量上考虑,多组避雷器共同分担了合闸时的冲击能量;而单个避雷器承担的能量,从“无措施”时的 720 kJ 降至“加 3 组避雷器”时的 420 kJ,远小于 500 kV 交流避雷器的能量承受极限 3~6 MJ,因而不会发生避雷器的故障损坏。

对于长度为 500 和 600 km 的 500 kV 线路,由于容升效应更为显著,在沿线增加 3 组避雷器后,合空线过电压幅值仍可达 2.03 和 2.11 pu,超出了规程中的限值。此时,只有配置合闸电阻才能有效限制该过电压,限制效果如表 6 所示。

表 6 合闸电阻对长度为 500 和 600 km 的 500 kV 线路合空线过电压的限制作用

Tab. 6 Restrictive effects of closing resistors on switching surges due to closing no-load lines with length of 500 km and 600 km respectively pu

| 线路长度/km | 合闸电阻/ Ω | | | |
|---------|----------------|-------|-------|-------|
| | 无 | 100 | 200 | 300 |
| 500 | 2.227 | 1.762 | 1.841 | 1.842 |
| 600 | 2.410 | 1.782 | 1.966 | 1.967 |

综上,从合闸过电压控制的角度分析,长度在 100 km 以下的 500 kV 线路取消合闸电阻措施是可行的;长度在 100~200 km 范围内的线路可否取消合闸电阻宜对具体线路进行计算验证;200~400 km 长度内的线路一般考虑采用合闸电阻限制过电压,也可采用沿线布置 2~3 组避雷器的方法,但该方法尚未得到具体实践的验证;长度在 400~600 km 范围内的线路则应采用合闸电阻来限制合空线过电压。

2 1000 kV 交流线路分析

2.1 仿真参数

1 000 kV 系统三相合空线过电压仍采用图 1 所示的模型,取三相不同期性为 5 ms^[14,19]。

系统参数参考我国晋东南—南阳—荆门特高压示范线路^[2],高抗补偿度采用 80%,两端平均分布;塔形采用猫头塔;导线型号采用钢芯铝绞线 8×LGJ-500/35、分裂间距为 400 mm^[21]。避雷器采用中国电科院的 1 000 kV 线路型避雷器^[14,22],具体参数如表 7 所示。

表 7 我国特高压交流系统避雷器参数

Tab. 7 Characteristic parameters of MOA adopted in 1 000 V AC power transmission project in China

| 额定电压/kV | 持续运行电压/kV | 操作冲击残压(峰值)/kV | 雷电冲击残压(峰值)/kV |
|---------|-----------|---------------|---------------|
| 828 | 636 | 1 430(1 kA) | 1 460(2 kA) |
| | | 1 553(10 kA) | 1 620(20 kA) |

由上文的研究结果可知,对于 500 kV 系统,短线路可取消合闸电阻;长线路一般应采用合闸电阻,但也可采用多组避雷器来限制合空线过电压。那么,特高压系统对合空线过电压的限制是否与 500 kV 系统一致,下面分别通过对 1000 kV 短线路和长线路过电压的计算进行分析说明。

2.2 过电压研究

2.2.1 短线路过电压分析

以长度为 100 km 的 1000 kV 线路为例,对合空线过电压进行计算,计算结果如图 7 所示。

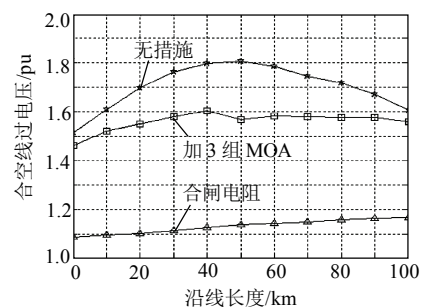


图 7 长度为 100 km 的 1000 kV 线路合空线过电压的沿线分布

Fig. 7 Distributions of switching surges due to closing no-load 1 000 kV transmission lines with length of 100 km

根据计算结果可知:

1) 对于较短的线路,在不使用合闸电阻时,仅能将过电压限制在 1.8 pu 附近,因其超过规程允许值 1.7 pu,达不到特高压系统规程规定的要求。

2) 当沿线增加 3 组避雷器共同防御后,才能将过电压限制为满足规程要求的 1.6 pu,但裕度较低,可见仅采用避雷器措施限制特高压过电压的难度较

高；但当采用合闸电阻措施后，该过电压得到了明显限制。其幅值仅为 1.17 pu，裕度较大，效果显著。

2.2.2 长线路过电压分析

由于我国特高压交流线路一般较长，如晋东南—南阳—荆门线路两段长度均在 300 km 左右。故以长度为 300 km 的线路为例进行分析，结果如图 8 所示。

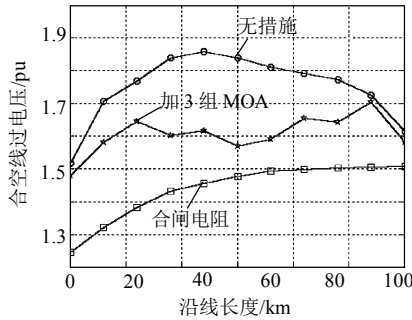


图 8 长度为 300 km 的 1 000 kV 线路合空线过电压的分布

Fig. 8 Distributions of switching surges due to closing no-load 1 000 kV transmission lines with length of 300 km

由图 8 可见，对于长度为 300 km 的线路，即使沿线增加 3 组避雷器，过电压仍大于 1.7 pu，难以得到较好的限制，考虑到再增加避雷器会导致故障率增高以及经济性不合理等问题，故认为仅采用沿线增加避雷器的措施是不合适的；而采用合闸电阻措施后，该过电压幅值为 1.5 pu，得到了有效限制，且裕度较大。

综上，从合闸过电压控制的角度出发，特高压交流系统宜采用合闸电阻。

2.3 合闸电阻与线路长度关系的研究

事实上，国内外所有特高压线路的国家，如前苏联、日本、美国等，均采用了合闸电阻。且实际运行经验表明，采用合闸电阻能有效防御合闸过电压，效果较好。

因线路长短有差别，这些国家对合闸电阻的取值也存在着差异。线路长度较短的国家，如日本和意大利，采用的合闸电阻取值较高，分别为 700 Ω 和 500 Ω；而线路长度较长的国家，如前苏联和美国，采用的合闸电阻取值则较低，分别为 378 Ω 和 300 Ω^[2,4]。

不同线路长度下合闸电阻阻值对过电压影响的计算结果如图 9 所示。

由图 9 可见，随着合闸电阻阻值的增加，沿线最大过电压幅值曲线均先减后增呈现“V”形，不同线路长度下存在一个最合适的阻值使得过电压最低；经过合闸电阻限制后的最小过电压随长度的增

加而逐渐增高，但均小于 1.25 pu，限制效果显著，见图 10；当较长的线路采用较低阻值的合闸电阻，而较短线路采用较高的阻值时，更有利于过电压的控制，见图 11。

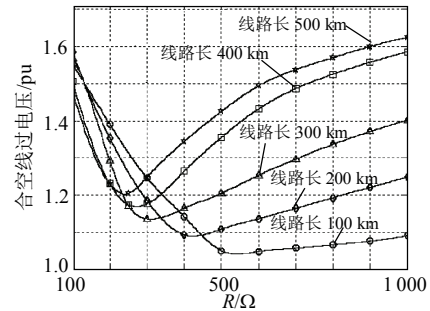


图 9 不同合闸电阻下的合空线过电压

Fig. 9 Switching surges due to closing no-load UHV AC transmission line with different lengths under different closing resistors

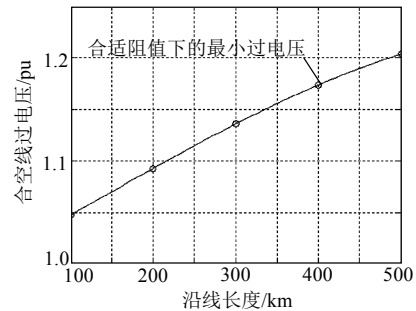


图 10 合适电阻下的最小合空线过电压

Fig. 10 Minimum switching surges due to closing no-load line under appropriate values of closing resistors

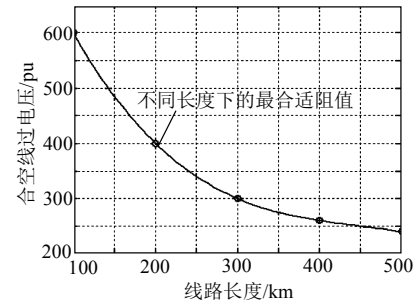


图 11 不同长度下的合闸电阻的最合适阻值

Fig. 11 Appropriate values of closing resistor under different lengths of transmission lines

出现这种现象的原因分析如下：合闸电阻的使用可分为图 12 所示的 2 个过程，先将电阻接入电路(合闸 Q_2)，一段时间后再将电阻短接退出(合闸 Q_1)，从而可缓和线路冲击，降低过电压幅值。其中，合闸电阻的接入和退出均可导致过电压，接入时希望合闸电阻越高越好，而退出时希望合闸电阻

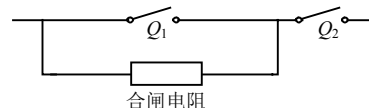


图 12 合闸电阻示意图

Fig. 12 Schematic diagram of closing resistor

越低越好。

此外，由于特高压空载线路的容抗远大于线路感抗，故空载线路可用电容来等效。在采用合闸电阻后，线路上的电压大小是电容与合闸电阻的分压结果，如图 13(a)、(b)所示。

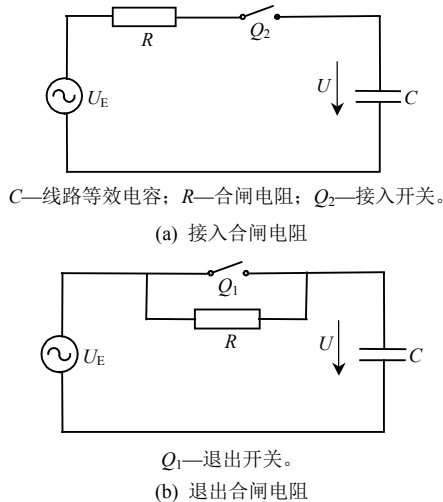


图 13 合闸电阻接入与退出过程

Fig. 13 Switching in/off of closing resistor

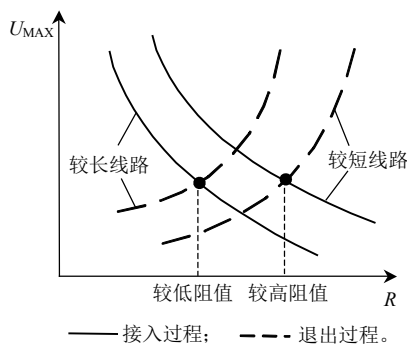
合闸电阻的接入过程如图 13(a)所示。在阻值相同的情况下，线路越长，线路等效电容 C 就越大，容抗 X_C 就越小，在稳态后该电容所分担的电压 $U_C = U_E / \sqrt{1 + (R/X_C)^2}$ 就越低。根据过电压幅值的估算公式

$$U_{MAX} = 2U_{steady} - U_{inc} = 2U_C \quad (1)$$

式中： U_C 为稳态后电容所分担的电压；稳态电压 $U_{steady} = U_C$ ；初始电压 $U_{inc} = 0$ 。

可知，线路越长过电压反而越低。如图 14 所示，接入过程中，在相同合闸电阻的情况下，较长线路的过电压低于较短线路。

合闸电阻的退出过程如图 13(b)所示。退出前线



图中交叉点的横坐标即为该长度下控制合闸过电压的最合适合闸电阻阻值。

图 14 较长及较短线路最合闸电阻阻值分析

Fig. 14 Determination of appropriate values of closing resistors for transmission lines with different lengths

路电容所分担的稳态电压 U_C 成为初始电压，退出后的稳态电压为电源电压 U_E (为固定值)。因此，由估算公式可得

$$U'_{MAX} = 2U_{steady} - U_{inc} = 2U_E - U_C \quad (2)$$

式中： $U_{steady} = U_E$ ； $U_{inc} = U_C$ 。

所以，线路越长 U_C 越低，因而过电压越高。如图 14 所示，退出过程中，在合闸电阻相同的条件下，较长线路的过电压高于较短线路的过电压。

由图 14 可知，对于接入过程，过电压随合闸电阻的增加而降低；对于退出过程，过电压随电阻的增加而升高。所以存在一个合适的合闸电阻阻值使得这两个过程产生的过电压在整体上最低，即与图中同一长度线路的接入过程曲线和退出过程曲线的交叉点相对应的合闸电阻阻值。而且较长线路对应的最合闸电阻阻值较低，较短线路对应的最合闸电阻阻值较高。

从能量角度分析，上述趋势也是合理的。线路越长，合空线过电压越严重，合闸电阻所吸收的能量也应随之增加，而合闸电阻的吸收能量随其阻值的减少而增加，因此，长线路采用低电阻，可吸收更大的能量，更好地降低过电压。根据计算，不同合闸电阻所要求的最大允许吸收能量如表 8 所示。

表 8 合闸电阻最大允许吸收能量

Tab. 8 Maximum allowed energy absorbed by different closing resistors

| 合闸电阻阻值/ Ω | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
|------------------|-------|------|------|------|------|------|
| 最大允许能量/MJ | 104.8 | 69.9 | 52.4 | 41.9 | 35.0 | 30.0 |

3 结论

1) 对于长度在 100 km 以下的 500 kV 交流线路，取消合闸电阻是可行的；长度在 100~200 km 内的 500 kV 交流线路可否取消合闸电阻，宜在对线路进行具体合空线过电压计算验证后决定；对于长度在 200~400 km 的 500 kV 交流线路，一般应采用合闸电阻，也可采取在沿线布置 2~3 组避雷器的方法来替代合闸电阻，但后者在实践中应用还不多；当长度在 400~600 km 时，仍应采用合闸电阻来限制合空线过电压。

目前，我国 500 kV 线路趋向于短距离传输，长度为 100 km 以下的线路越来越多，本文对 500 kV 短线路取消合闸电阻的研究具有实际意义。

2) 对于 1000 kV 交流系统，即使是长度为 100 km 的短线路，在没有合闸电阻的情况下合空线过电压不能满足规程要求，且采用多组避雷器限制

的效果也较勉强,因此,短线路应采取合闸电阻的限制措施。对于较长线路,采用多组避雷器也不能达到限制过电压的要求,故必须采用合闸电阻。所以,在1000kV交流系统中,一般应采取合闸电阻。

3)对于1000kV交流系统,较长线路宜采用较低阻值的合闸电阻,而较短线路宜采用较高阻值的合闸电阻,这样更有利于抑制合空线过电压。

参考文献

- [1] 周浩. 高电压技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [3] Fakheri A J, Bhatt N B, Ware B J, et al. Analysis and control of transient over-voltages on UHV transmission systems[J]. IEEE PAS, 1983, 102(10): 3315-3328.
- [4] 计荣荣, 周浩. 特高压交流系统的操作过电压及其控制研究[J]. 电力建设, 2009, 30(9): 28-30.
Ji Rongrong, Zhou Hao. Study on switching over-voltage and its restrictions in UHVAC System[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(9): 28-30(in Chinese).
- [5] 中华人民共和国水利电力部标准. 500 kV 电网过电压保护绝缘配合与电气设备接地暂行技术标准[S]. 北京: 水利电力总电力科学研究院高压研究所, 1984.
- [6] 中华人民共和国电力行业标准. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中华人民共和国电力工业部, 1997.
- [7] 国家电网公司企业标准. 1000kV 特高压输变电工程过电压及绝缘配合[S]. 北京: 中华人民共和国国家电网公司, 2007.
- [8] Lgeate A C. Elimination of closing resistors on EHV circuit breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(1): 223-231.
- [9] 谷定燮. 对我国特高压输电系统过电压和绝缘配合的建议[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 29-32.
Gu Dingxie. Overvoltage and insulation coordination on ultra high voltage power transmission system in China[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 29-32(in Chinese).
- [10] Riberiro J R. An application of metal oxide surge arresters in the elimination of need for closing resistors in EHV breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 282-291.
- [11] Eriksson A. Optimized line switching surge control using circuit breakers without closing resistors[C]//CIGRE 1990. Paris, France: CIGRE, 1990.
- [12] 周志芳. 500 kV 断路器取消合闸电阻问题的研究[J]. 电网技术, 1997, 21(12): 9-11.
Zhou Zhifang. Research on eliminating closing resistor for 500 kV circuit breakers[J]. Power System Technology, 1997, 21(12): 9-11(in Chinese).
- [13] 杜澍春. 500 kV 电网线路断路器取消合闸电阻的可行性研究[J]. 电网技术, 1995, 19(11): 30-34.
Du Shuchun. The feasibility of eliminating closing resistors for 500 kV circuit breakers[J]. Power System Technology, 1995, 19(11): 30-34(in Chinese).
- [14] 中国电力科学研究院. 1000 kV 特高压交流同塔双回线路过电压和绝缘配合研究(第一部分)[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [15] Lings R, Chartier V, Maruvada P S. Overview of transmission lines above 700 kV. Inaugural[C]//IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa. Durban, South Africa: IEEE, 2005: 33-43.
- [16] Huang Daochun, Ruan Jiangjun, Yu Shifeng. Overview of the recent developments of ultra high voltage AC transmission in China [C]//Power and Energy Society General Meeting. Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008: 1-9.
- [17] 中华人民共和国国家标准. 交流无间隙金属氧化物避雷器[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 2000.
- [18] 国家电网公司. 国家电网公司输变电工程典型设计: 500 kV 输电线路分册[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [19] 夏成军, 张尧. 合空线统计过电压的建模与仿真[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 11-15.
Xia Chengjun, Zhang Yao. Model and simulation of statistical line-energizing over-voltage[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 1-15(in Chinese).
- [20] 陈军. 超高压长线路电容效应引起的过电压仿真研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 121-123.
Chen Jun. Simulation study on the overvoltage of long distance EHV transmission lines induced by capacitance influences[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 121-123(in Chinese).
- [21] 舒印彪. 1000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T1-T6.
- [22] 刘振亚. 特高压交流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.



计荣荣

收稿日期: 2010-06-23。

作者简介:

计荣荣(1985), 男, 硕士研究生, 从事电力系统过电压方面的研究, E-mail: dashijrr@zju.edu.cn。

(编辑 杨天和)