

同塔同窗同相序紧凑型输电线路潜供电流与恢复电压研究

龚有军

(广东省电力设计研究院, 广州 510663)

摘要: 从同塔同窗同相序紧凑型输电线路的潜供电流和恢复电压的产生机理出发, 对该输电方式的潜供电流和恢复电压特性进行了理论分析与仿真计算。结果表明, 采用同塔同窗同相序排列有利于降低线路的潜供电流与恢复电压; 在合适的高抗及中性点小电抗配置下, 该输电方式的潜供电流及恢复电压可被抑制在较小的数值范围之内。

关键词: 同塔同窗同相序紧凑型; 潜供电流; 恢复电压

Research on the Secondary Arc Current and Recovery Voltage of Two Compact Circuits with the Same Array of Phase in One Pylon Window

GONG Youjun

(Guangdong Electric Design Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The mechanism causing secondary arc current and recovery voltage of two compact circuits with the same array of phase in one pylon window is introduced. The characteristics of secondary arc current and recovery voltage in such transmission are analyzed, concerning both theoretical aspects and simulation calculation. The results showed that, the transmission of two compact circuits with the same array of phase in one pylon window is beneficial to the suppression of the secondary arc current and the recovery voltage; the secondary arc current and the recovery voltage of the lines could be reduced to acceptable value if proper high-voltage shunt reactors and netual reactors are applied.

Key words: two compact circuits with the same array of phase in one pylon window; secondary arc current; recovery voltage

运行经验表明, 在超高压输电线路中, 单相接地故障占全部线路故障的比例最高, 而且其中大部分是瞬时故障^[1-3]。为了保证供电可靠性和系统稳定性, 我国电力行业相关标准规定, 超高压输电线路必须采用单相重合闸^[4-6]。

高电压等级紧凑型线路由于电压等级高、输送距离长、加之相间电容大, 因此线路的潜供电流大、恢复电压高, 单相重合闸难以在无电流间隔时间内可靠地熄灭潜供电流。作为新型的输电方式, 同塔同窗同相序紧凑型输电线路的潜供电流与恢复电压特性还不是很清楚。因此, 研究其潜供电流和恢复电压特性具有重要意义。

1 潜供电流和恢复电压产生机理

单相重合闸切除单相瞬时接地故障之后, 由于健全相和故障相之间存在电容耦合和互感耦合, 接地点仍会流过持续电流, 即潜供电流; 潜供电流熄

灭后, 瞬时故障处的电压叫恢复电压^[7], 见图 1。

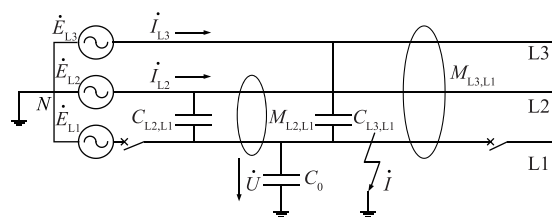


图 1 超高压输电线路潜供电流产生示意图

Fig. 1 Diagram of Secondary Arc Current Generated by EHV Lines

由于耦合而产生的潜供电流和恢复电压可以分为两部分: 通过电容耦合而产生的静电分量和通过相间互感耦合而产生的电磁分量。如图 1 所示, 故障发生后, L1 相恢复电压的静电分量和电磁分量可由公式 (1) 和公式 (2) 表示:

$$\dot{U}_{SC} = \dot{E}_{L1} \frac{C_{L3,L1}}{C_{L3,L1} + C_0} + \dot{E}_{L2} \frac{C_{L2,L1}}{C_{L2,L1} + C_0}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_{SM} = j\omega M_{L3,L1} \dot{i}_{L3} + j\omega M_{L2,L1} \dot{i}_{L2}. \quad (2)$$

除了潜供电流和恢复电压的稳态分量以外，由于残余在导线上的电荷也会在故障回路中释放，形成潜供电流或恢复电压的暂态分量。因此，输电线路的潜供电流为稳态量和暂态量的叠加，如图2和图3所示。

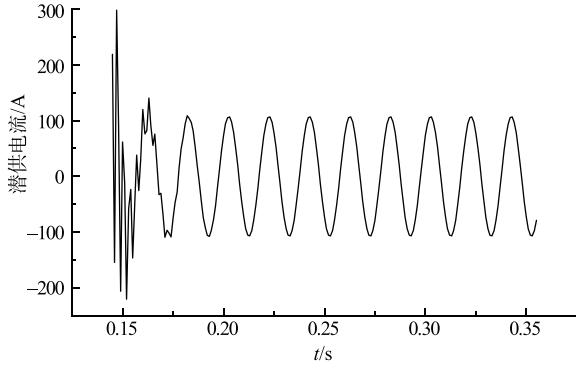


图2 典型潜供电流波形

Fig. 2 Typical Waveform of Secondary Arc Current

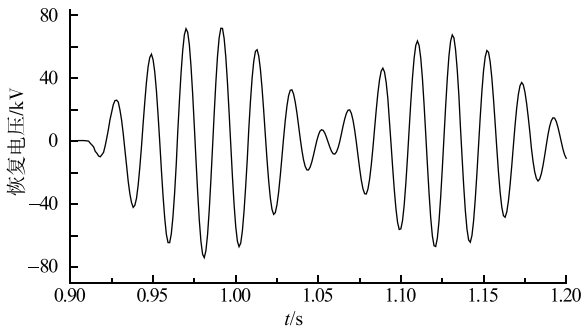


图3 典型恢复电压波形

Fig. 3 Typical Waveform of Recovery Voltage

对于潜供电流，一般关心其稳态分量。根据实验数据，潜供电流熄灭以后弧道空气的去游离时间一般需要 $0.06 \text{ s}^{[8]}$ ，在此时间范围内，如果故障处的恢复电压增加到比较高的水平，则有可能使间隙重新击穿，导致灭弧失败。

2 潜供电流理论分析

同塔同窗同相序紧凑型输电方式如图4所示，其中双回为同相序垂直排列且位于一个塔窗内。可见，这种输电方式的相间距离和回间距离都很小，相间及回间耦合大。因此，当发生单相接地故障并跳闸后，不仅本回线路健全相对故障相有很强的耦合，另一回线路对故障相的耦合也很强，甚至更大。

以图4为例，假设故障发生后，健全相的电压

电流均没有畸变，则当 L1-1 相发生故障后，L1-1 相恢复电压的静电分量可如式(3)表示。

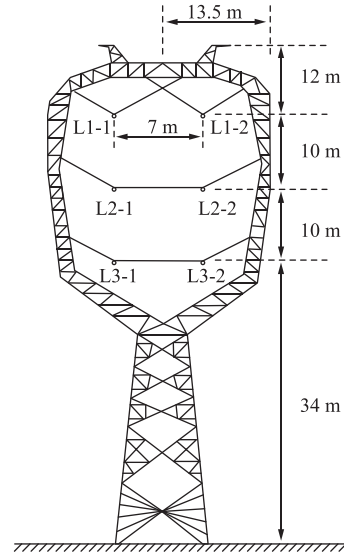


图4 同塔同窗同相序紧凑型输电方式示意图

Fig. 4 Power Transmission Lines with Two Compact Circuits with the Same Array of Phase in One Pylon Window

$$\begin{aligned} \dot{U}_{L1-1,L3} = & \dot{U}_{L2-1} \frac{C_{L2-1,L1-1}}{C_{L2-1,L1-1} + C_{L1-1}} + \dot{U}_{C1} \frac{C_{L3-1,L1-1}}{C_{L3-1,L1-1} + C_{L1-1}} + \\ & \dot{U}_{L1-2} \frac{C_{L1-2,L1-1}}{C_{L1-2,L1-1} + C_{L1-1}} + \dot{U}_{L2-2} \frac{C_{L2-2,L1-1}}{C_{L2-2,L1-1} + C_{L1-1}} + \\ & \dot{U}_{L3-2} \frac{C_{L3-2,L1-1}}{C_{L3-2,L1-1} + C_{L1-1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $\dot{U}_{L1-2} + \dot{U}_{L2-2} + \dot{U}_{L3-2} = 0$ ，且 $\dot{U}_{L2-2} = \dot{U}_{L2-1}$ ， $\dot{U}_{L3-2} = \dot{U}_{L3-1}$ 。式(3)可变为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{L1-1,L3} = & \dot{U}_{L2} \left(\frac{C_{L2-1,L1-1}}{C_{L2-1,L1-1} + C_{L1-1}} + \frac{C_{L2-2,L1-1}}{C_{L2-2,L1-1} + C_{L1-1}} \frac{C_{L1-2,L1-1}}{C_{L1-2,L1-1} + C_{L1-1}} \right) + \\ & \dot{U}_{L3} \left(\frac{C_{L3-1,L1-1}}{C_{L3-1,L1-1} + C_{L1-1}} + \frac{C_{L3-2,L1-1}}{C_{L3-2,L1-1} + C_{L1-1}} \frac{C_{L1-2,L1-1}}{C_{L1-2,L1-1} + C_{L1-1}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

同理，恢复电压的电磁分量可以表示为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{L1-1,M} = & j\omega(M_{L2-1,L1-1} + M_{L2-2,L1-1} - M_{L1-2,L1-1}) \times \dot{I}_{L2} + \\ & j\omega(M_{L3-1,L1-1} + M_{L3-2,L1-1} - M_{L1-2,L1-1}) \times \dot{I}_{L3}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{恢复电压为 } \dot{U}_{L1-1} = \dot{U}_{L1-1,L3} + \dot{U}_{L1-1,M}. \quad (6)$$

由式(4)及式(5)可知，双回线路恢复电压与单回输电线路相比是增大还是减小取决于故障相在另一回线路中的同名相和不同名相对故障相的互感、互电容大小关系。无故障回路对故障相的恢复

电压不一定起增强作用。同样的分析适用于线路的潜供电流情况。同塔同窗同相序紧凑型输电方式由于两回线路同名相之间的距离是异名相之间的距离的二分之一甚至三分之一，无故障回路的同名相对故障相潜供电流和恢复电压的削弱作用要大于异名相对故障相潜供电流和恢复电压的增强作用，如图 5 所示。

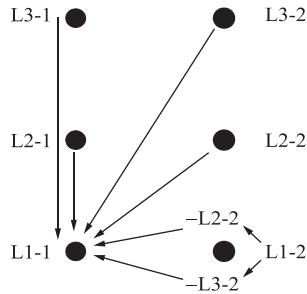


图 5 同塔同窗同相序紧凑型线路耦合示意图

Fig. 5 Diagram of Coupling of Two Compact Transmission Lines with the Same Array of Phase in One Pylon Window

3 潜供电流抑制措施

虽然同塔同窗同相序紧凑型输电线路双回运行时的潜供电流与恢复电压比单回运行时要小，但是如果采取其他措施，则其潜供电流与恢复电压还是较大。超、特高压输电线路一般较长，为了保证重合闸时潜供电流熄灭，目前一般采用的技术手段有两种。一种是在高抗中性点加小电抗，补偿由于相间电容耦合过来的容性电流分量，小电抗的选择一般按照全补偿的原则进行。一种是采用高速接地开关，将故障相两端快速接地，大幅度降低线路的恢复电压，从而加快潜供电流的熄灭。目前我国一般采用前者来降低线路的潜供电流。

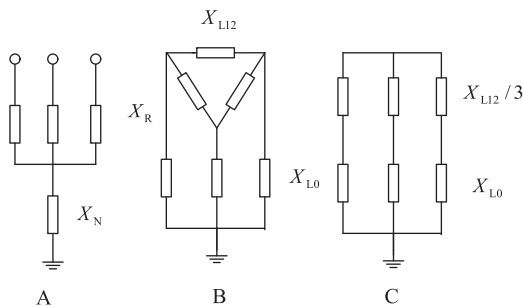


图 6 中性点小电抗及其等值形式

Fig. 6 Neutral Reactance and Its Equal Form

图 6A 为并联电抗器及其中性点小电抗的连接

方式，图 6B 为等值后的相间连接形式，图 6C 为图 6B 等值后的星型连接方式。

并联电抗器的等值零序电抗为 X_{L0} 。

$$X_{L0} = X_{R0} + 3X_N \quad (7)$$

根据图 6C 得到并联电抗器的相间电抗

$$X_{R1} = \frac{X_{L12} X_{L0}}{X_{L12} + 3X_{L0}} \quad (8)$$

根据式 (8) 可以推出：

$$X_{L12} = \frac{3X_{R1} X_{L0}}{X_{L0} - X_{R1}} \quad (9)$$

对于并联电抗器有 $X_{R1} = X_{R0} = X_R$ ，并将式 (7) 代入式 (9)，可以推出：

$$X_{L12} = 3X_R + X_R^2 / X_N$$

表 1 给出了图 4 所示线路的线路电容参数。可见，两回线路同名相之间的互电容是非同名相之间互电容的 2.5 倍左右，非常有利于控制线路的潜供电流与恢复电压。根据表 1 所述的参数与相间电容全补偿的原则，表 2 给出了不同的并补度下线路高抗及中性点小电抗的数值。其中，线路高抗与中性点小电抗按对称原则布置在安装在线路两端。

表 1 电容参数表

Tab. 1		Tablet of the Capacity Parameters					nF/km
相别	L1-1	L2-1	L3-1	L1-2	L2-2	L3-2	
L1-1	14.2	-2.4	-0.6	-3.7	-1.3	-0.4	
L2-1	-2.4	14.6	-2.5	-1.3	-3.4	-1.4	
L3-1	-0.6	-2.5	14.0	-0.4	-1.4	-4.0	
L1-2	-3.7	-1.3	-0.4	14.2	-2.4	-0.6	
L2-2	-1.3	-3.4	-1.4	-2.4	14.6	-2.5	
L3-2	-0.4	-1.4	-4.0	-0.6	-2.5	14.0	

表 2 高抗及中性点小电抗选择

Tab. 2		Selection of High Reactance and Small Reactance at Neutral Point			
并补度	373 km		600 km		
	高抗	小电抗	高抗	小电抗	
70%	330 MW	550 Ω	510 MW	350 Ω	
80%	360 MW	400 Ω	570 MW	250 Ω	

4 潜供电流仿真分析

以图 4 所示的同塔同窗同相序紧凑型输电线路的参数为例，相间距离取 10 m，回间距离取 7 m，导线采用 6 × LGJ-400/35，分裂间距 400 mm，线路

电压取 750 kV, 根据文献[9-11]在 PSCAD 中建立潜供电流计算模型。设线路长度为 373 km 并假定并联补偿度为 80%, 则线路两端各安装两组容量为 360 MW 的高抗; 考虑到中性点小电抗都是分级调整, 因此选择小电抗的值为 400 Ω , 接近完全补偿。

在两回分别为一个完整换位情况下, 考虑潜供电流和恢复电压最严重情况^[12], 在同塔同窗同相序紧凑型输电线路首端发生单相接地故障时的潜供电流与恢复电压分别如图 7 与图 8 所示。由图 7 与图 8 可知, 同塔同窗同相序紧凑型输电线路发生单相接地故障时, 由于健全回路对故障相的耦合作用, 双回运行情况下的潜供电流与恢复电压比单回运行情况下的要小, 验证了前面的理论分析。在潜供电流达到稳态时, 双回运行情况下的潜供电流为 23 A, 单回运行情况下的潜供电流为 27 A, 潜供电流的减小约为 15%。从图 7 也可得知, 相对于单回运行情况, 同塔同窗同相序紧凑型输电线路在双回运行情况下的恢复电压也减小了约 14%。

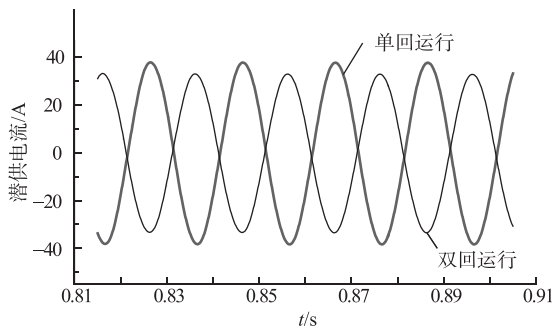


图 7 潜供电流对比

Fig. 7 The Comparison of the Secondary Arc Current

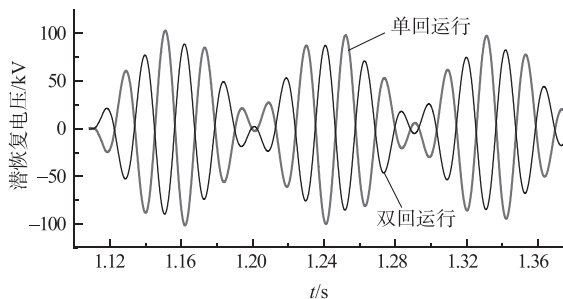


图 8 恢复电压对比

Fig. 8 Comparison of the Recovery Voltage

5 结论

1) 理论分析与仿真结果表明, 同塔同窗同相

序紧凑型输电线路健全回路对故障相的潜供电流有削弱作用, 在本文所示计算条件下, 削弱幅度约为 15%。

2) 理论分析表明, 回间的距离越短, 健全回路对故障相的潜供电流与恢复电压的削弱作用越加明显。

3) 在相间电容全补偿的情况下, 可以将同塔同窗同相序紧凑型线路的潜供电流与恢复电压限值在较低的数值。

参考文献:

- [1] 易辉, 熊幼京. 1 000 kV 交流特高压输电线路运行特性分析[J]. 电网技术, 2006, 30 (15): 1-7.
YI Hui, XIONG Youjing. Analysis on Operating Characteristic for 1 000 kV AC UHV Transmission Line[J]. Power System Technology, 2006, 30 (15): 1-7.
- [2] RAMOLD M, IDARRAGA G, JAGER J. Transient Shunt Reactor Dimensioning for Bulk Power Transmission Systems during Normal and Faulty Network Conditions[C]. International Conference on Power System Technology, 2006: 1-6.
- [3] 关志成, 贺以燕, 杨迎建, 等. 俄罗斯、乌克兰超、特高压输电技术发展新况[J]. 电力设备, 2003, 4 (2): 49-56.
- [4] DL/T 559-1994, 220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规定[S].
- [5] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] KIMBARK E W. Selective-Pole Switching of Long Double-Circuit EHV Line[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95 (1): 219-230.
- [7] 柴旭铮. 柔性紧凑型输电技术研究[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2007.
- [8] 梅忠怒. 超高压电网潜供电流与单相重合闸[J]. 云南电力技术, 1999, 27 (2): 9-11.
- [9] TAYLOR C W. 电力系统电压稳定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] 梅忠怒. 超高压电网潜供电流与单相重合闸 II [J]. 云南电力技术, 1999, 27 (3): 15-18.
- [11] PRASAD G B D V. EMTF Simulation of Fast Transient in Gas Insulated Switchgear[C]// Proc. 10th ISH. Montreal, 1997.
- [12] 韩彦华, 施围. 故障点接地电阻对超高压输电线路潜供电流的影响[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36 (6): 555-603.
HAN Yanhua, SHI Wei. Effects of Grounding Resistance on Secondary Arc Current in Extra-High-Voltage Transmission Lines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36 (6): 555-603.

收稿日期: 2009-02-21

作者简介:

龚有军 (1984), 男, 湖南湘乡人, 硕士, 从事超、特高压输电技术的设计、研究工作 (e-mail) gongyj06@gmail.com。