

同塔双回线路准三相运行及改进跳合闸策略研究

李世龙¹, 滕予非¹, 李小鹏¹, 尹项根², 陈卫²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院 湖北 武汉 430074)

摘要: 传统同塔双回线路保护为单回线配置,即按两回独立线路配置保护,因此跳合闸策略也多为独立配置,跨线故障发生后将导致同塔双回线路全线跳闸。线路两侧系统电气联系中断,造成严重负荷损失,威胁电力系统安全稳定运行。针对全程同塔双回的输电线路,重新定义了准三相运行,并对准三相运行的可行性进行了分析。在此基础上提出了同塔双回线路改进跳合闸策略,降低故障后全线跳闸的概率,减少断路器的跳合闸操作次数。利用 PSCAD/EMTDC 搭建了典型同塔双回线路模型,验证了准三相运行的可行性,并分析验证了改进跳合闸策略的优势。

关键词: 同塔双回线路;准三相运行;跳合闸策略;PSCAD/EMTDC

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)03-0013-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.03.004

Research on Tripping and Reclosing Strategy and Quasi - three - phase Operation of Double - circuit Transmission Lines on the Same Tower

Li Shilong¹, Teng Yufei¹, Li Xiaopeng¹, Yin Xianggen², Chen Wei²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Conventional protection of double - circuit transmission lines on the same tower trips and recloses the two circuits independently after the faults occurring in transmission line. The possibility of tripping all lines is high when inter - circuit faults occur. Large amount of load will be rejected and electrical link between two sides will be disconnected, which has negative effects on the stability of power system. A novel tripping and reclosing strategy is proposed which regards the double circuits as a whole. It can decrease the possibility of tripping all lines and reclose to permanent faults. The feasibility of quasi - three - phase operation (QTPO) is analyzed. A typical model of double - circuit transmission lines on the same tower is established in PSCAD/EMTDC. Some important electrical indexes which can reflect the performance of QTPO are analyzed by simulation.

Key words: double - circuit transmission lines on the same tower; quasi - three - phase operation; tripping and reclosing strategy; PSCAD/EMTDC

0 引言

同塔双回线路由于其占地面积小,输电容量大等优势广泛应用于超高压输电线路。目前同塔双回线路的跳合闸策略多为双回线单独配置,跨线故障发生后同塔双回线路存在极大被双线路切除的可能性^[1]。输电线路中的短路故障多为瞬时性故障,切除故障线路后通过重合闸可实现系统恢复正常运

行^[2]。对于永久性故障,盲目重合将对电力系统造成二次冲击,对电力系统稳定造成更大危害^[3]。因此需对瞬时性故障和永久性故障予以区分,由此引出的自适应重合闸得到了广泛关注。传统单回线的自适应重合闸主要利用电弧特性、恢复电压和限流电抗器电流^[2,4,5]等电气量特性构成。然而同塔双回线故障种类多样,线间自互感作用复杂,对故障性质的判别产生较大影响。目前对于应用于同塔双回线路的自适应重合闸研究较少,文献[6]通过对永

久性和瞬时性故障后故障点电压特性的分析与比较,提出一种同塔双回线路自适应重合闸判据,对于永久性故障切除故障线路并闭锁重合闸;对于瞬时性故障,切除故障线路后按相重合,根据减少系统震荡维持系统稳定的原则确定故障后的重合时间。文献[7]针对同塔双回线路单相故障和单相跨线故障提出一种自适应重合闸组合判据,组合判据中包括相位自适应判据和电压自适应判据,兼顾二者的优势并弥补各自的不足,有利于提高重合闸成功率,降低永久性故障对系统稳定的影响。文献[8]提出了一种基于波形估计的瞬时故障与永久性故障判别方法,通过单相接地瞬时性构造目标函数进而得到故障性质判断值,此方法不受过渡电阻、故障位置等因素影响,具有较高的可靠性。文献[9]利用故障相并联电抗器差模电流瞬时故障后只存在衰减周期分量,而永久故障中只存在衰减直流分量的特征,提出一种仅需要单端电气量的自适应的三相重合闸判据。同塔双回线路的传输容量通常较大,若故障后造成全线切除将导致受端较大的功率缺额,影响系统稳定。文献[10]对同塔双回线路准三相运行进行了初步探讨,准三相运行作为一种故障后的短时运行方式,有利于维持功率传输和系统稳定。

针对目前同塔双回线路在传统跳合闸策略下跨线故障发生后容易造成两回线路全部跳闸,且自适应重合闸策略目前在同塔双回线路应用较少的情况,基于同塔双回线路保护一体化思想,将两端共母线的同塔双回线路作为一个整体,提出一种基于准三相运行的同塔双回线路跳合闸策略。

1 准三相运行及其特性研究

1.1 准三相运行定义

对于全程同塔双回的线路,故障后每相(ABC)中至少保留一回输电线路的故障后非全相运行方式。根据运行时所包含的电线根数,同塔双回线路准三相运行可分为:五线准三相运行(如1ABC2BC)、四线准三相运行(如1AB2BC、1AB2AC等)和三线准三相运行(如1A2BC、1AB2C等)。以往研究中定义的准三相运行属于三线准三相运行,是这里所定义准三相运行方式中的一种。与传统定

义相比,这里定义的准三相运行在故障后的非全相运行状态中有可能包含更多的电线根数,有利于提高故障后的线路传输功率,从而尽可能减少由于送端与受端功率不平衡对系统稳定造成的威胁。

全程同塔双回线路准三相运行的可行性分析将从准三相运行状态中的传输功率、线路过负荷、系统不平衡度和线路温升方面进行研究。考虑到同塔双回线路各线之间复杂的自互感作用以及实际工况中线路参数并不理想对称的情况,通过仿真手段对上述指标进行研究讨论,利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建同塔双回线路模型,线路全长150 km,电压等级500 kV,考虑到最恶劣的运行工况,同塔双回线路模型使用非理想换位的相频特性模型,杆塔模型空间结构如图1所示。

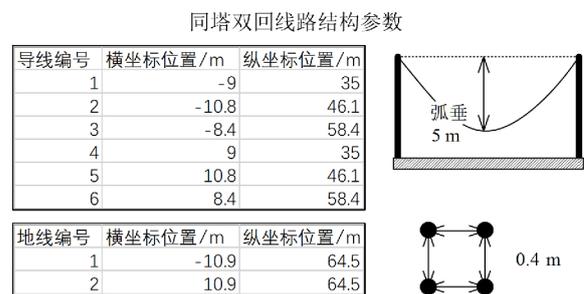


图1 同塔双回线路准三相运行线路模型结构

1.2 准三相运行状态中传输功率研究

准三相运行工况下的剩余传输功率决定着同塔双回线路受端侧负荷能否正常运行,若故障后传输功率缺额较大将影响受端系统的安全可靠运行。以线路重载情况为例,当额定有功功率为1500 MW时,进入不同准三相运行工况后的传输功率如表1所示。

表1 不同准三相运行工况下的传输功率

准三相运行方式		传输功率/(p. u.)
五线准三相	1ABC2BC	0.948
四线准三相	1ABC2A	0.903
	1AB2BC	0.897
三线准三相	1ABC	0.853
	1AB2C	0.844

表中功率基准值为正常运行条件下的额定有功功率值。可以看出,准三相运行线路数目越多,输送的有功功率越多,在三线准三相运行工况下仍可维持额定有功功率的80%以上,对于故障后的受端一

表2 不同准三相运行工况下的线路电流

额定有功功率 /MW	准三相运行工况	电流/kA					
		1A	1B	1C	2A	2B	2C
1500	正常运行	0.86	0.88	0.89	0.88	0.87	0.88
	1ABC2BC	1.48	0.94	0.86	0	0.83	0.90
	1ABC2A	0.87	1.51	1.54	0.85	0	0
	1AB2BC	1.49	0.89	0	0	0.88	1.50
	1ABC	1.45	1.53	1.52	0	0	0
	1AB2C	1.49	1.51	0	0	0	1.46

侧交流系统的功率维持有积极作用。对于四线准三相运行和三线准三相运行,若其中一回线能构成全相运行(如1ABC2A、1ABC),则其传输的有功功率大于相同线路数目的其他准三相运行工况。

1.3 准三相运行状态中过电流研究

同塔双回线路故障发生进入准三相运行状态后,原本故障相所承担的传输功率将转移到故障相的同名非故障线路,导致线路电流升高。线路电流升高一方面将导致线路温度升高,因输电线路受热膨胀使其总长度变长、弧垂下降,危及线路安全;另一方面,线路电流升高有可能导致过负荷保护的误动;因此需要对同塔双回线路准三相运行时的过电流进行研究。仍以线路额定有功功率分别为1500 MW的工况为例,不同准三相运行工况下的线路电流如表2所示。

准三相运行工况下的最大过电流率 K_{oc} 可定义为

$$K_{oc} = \left| \frac{I_{\varphi_{max}} - I_{op}}{I_{op}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_{op} 为同塔双回线路正常运行时线路中流过的电流; $I_{\varphi_{max}}$ 为同塔双回线路准三相运行时输电线路中流过的最大电流值。根据表2中的准三相运行电流数据,可得到不同工况下准三相运行的最大过电流率如表3所示。

表3 不同准三相运行工况下的最大过电流率

准三相工况	最大过载率/%
1ABC2BC	70
1ABC2A	77
1AB2BC	72
1ABC	75
1AB2C	73

由表3可看出,同塔双回线路准三相运行中最

大电流过载率不仅与准三相运行中的输电线路数目有关,还与其中一回线是否全相运行有关。由表1中的分析结果可知,准三相运行线路数目相同时,若一回线能满足全相运行时准三相的传输功率最大,此时线路最大过电流率也将最大,与表3中的仿真结果一致:相同电线根数的准三相运行工况下,若其中一回线能满足全相运行,其最大过电流率大于其他准三相运行工况。

1.4 准三相运行状态中不平衡度研究

不平衡度作为电能质量衡量指标之一,研究其在准三相运行工况下的变化有着重要意义。根据IEEE电能质量标准,不平衡度可利用负序电流值与正序电流值之比表示^[10]:

$$K_i = \left| \frac{I_{neg}}{I_{pos}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中: K_i 为电流不平衡度; I_{pos} 和 I_{neg} 分别为线路中正序电流和负序电流。

根据表2中的仿真结果,不同准三相运行工况下两回线路及母线处电流不平衡度如表4所示。

表4 准三相运行情况下的电流不平衡度

准三相运行工况	第1回线 电流不平 衡度/%	第2回线 电流不平 衡度/%	母线电流 不平衡度 /%
正常运行	0.62	2.10	1
1ABC2BC	18	54	6.7
1ABC2A	17	—	3.4
1AB2BC	62	64	5.9
1ABC	3.0	—	3.0
1AB2C	52	—	4.2

注:“—”表示“无”。

当同塔双回线路其中一回线只有1线运行时,此回线的正负零序电流均一致,此时不对其不平衡

度进行分析。由于同塔双回线路模型考虑到实际运行工况中的线路参数不对称情况,正常运行时线路电流存在一定程度的不对称。准三相运行时,除单回线构成的准三相运行工况(1ABC、2ABC)外,两回线路的不平衡度均较大,远超过国际标准中所规定的不平衡电流上限。同塔双回线路母线处的电流不平衡度在准三相运行中有一定程度升高,但仍处于规定范围内,不会对同塔双回线路两侧交流系统的电能质量造成严重影响。单回线内部的电流不平衡度较大有可能导致线路保护误动,但对线路以外的交流系统而言,同塔双回线路可以作为一个整体,其通过线路两端交流母线与外界相连,其母线电流所反映出的整体不对称度决定了准三相运行对外界的影响程度。因此同塔双回线路准三相运行不会威胁外部交流系统的安全稳定。

2 基于准三相运行的改进跳合闸策略

同塔双回线路单重接地故障按照故障是否接地和故障包含的同名相对数可分为如下几类,对于接地故障:

- 1) 无同名相接地故障,如 1AG、1ABG、1ABCG、1A2BCG 等;
- 2) 含一对同名相接地故障,如 1A2AG、1B2ABG、1AB2ACG 等;
- 3) 含两对及以上同名相接地故障,如 1AB2ABG;1ABC2ABCG 等。

对于不接地故障:

- 1) 无同名相线间故障,如 1AB、1ABC、1A2B、1A2BC 等;
- 2) 含一对同名相线间故障,如 1A2A、1B2AB、1AB2AC 等;
- 3) 含两对同名相线间故障,如 1AB2AB、1ABC2AB 等;
- 4) 含三对同名相线间故障,如 1ABC2ABC。

为尽可能维持故障后的传输功率并尽可能降低重合闸于永久性故障的概率,改进跳合闸策略从减少跳闸与合闸两方面进行改进。

减少需被切除的故障线路。对于全程同塔双回线路,由于线路两侧的同名相分别连接于相同母线上

因此当包含一对同名相的非接地线间故障发生时,这对同名相可被保留而不切除。这是因为同名相线路参数相近且两端分别接于相同母线,故同名相间非接地短路故障对系统影响微弱,只需将其他故障线路切除就能实现准三相运行。以 1A2AB 不接地故障为例,只需切除 2B 线路即可实现准三相运行。1A2A 线路不需要切除从而可在准三相运行时维持较多的输送功率。

减少需被重合的故障线路。对于所有可仅通过切除故障线路就能实现准三相运行的故障类型,在故障线路被切除后闭锁重合闸不再重合。以 1A2BG 为例,保护只需切除 1A2B 线路即可实现准三相运行。减少重合线路数可尽可能避免重合于永久性故障的可能性,目前同塔双回线路实际运行中使用自适应重合闸的线路非常少,因此缺乏对故障性质的判别。与传统重合闸策略相比此方案能够尽可能减少永久性故障对系统造成的二次冲击。对于切除故障线路后需重合一回故障线路才能实现准三相运行的故障类型,可进行重合闸。若重合闸成功,则同杆并架线路进入准三相运行状态,若重合失败则切除全部线路并闭锁重合闸。如 1A2AG 故障,1A 或 2A 在故障线路切除后可以尝试进行重合闸。对切除故障线路后需重合至少两回故障线路才能实现准三相运行的故障情况,则放弃进行重合闸操作,直接切除全部线路并闭锁重合闸。如 1AB2ABG 故障,至少需要重合两回线路才可实现准三相运行,此时故障后全线跳闸并闭锁重合闸。

根据上述原则,以 6 种典型同塔双回线故障为例,对比传统跳合闸策略和改进跳合闸策略,如表 5 所示。

故障后需要全线跳闸的故障种类大为减少,仅需切除故障线路。从而使双回线保留更多的传输功率,提高系统稳定性,减少了需重合的故障线路,降低了重合于永久性故障的概率。

考虑到永久性故障发生的可能性,在传统跳合闸策略下,故障发生后最终全线跳闸且闭锁重合闸的故障种类为 98 种,包括全部永久性故障时的跨线故障;不需重合进入准三相的短路故障种类为 16 种,包括所有同塔双回线路单回线相间故障;重合失败后进入准三相的短路故障种类为 6 种,包括所有

表5 6种典型故障的传统跳合闸策略与改进跳合闸策略对比

序号	故障线路	传统策略		改进策略	
		跳闸	重合	跳闸	重合
1	1AB2AB	全线跳闸	—	1B2B	1B/2B
2	1A2BC	1A2ABC	1A	2BC	—
3	1AB2ABC	全线跳闸	—	全线跳闸	1A2B/1AB/1B2A/2AB
4	1A2AG	1A2A	1A2A	1A2A	1A/2A
5	1A2BCG	1A2ABC	1A	1A2BC	—
6	1BCG	1ABC	—	1BC	—

注：“—”表示不进行任何操作，“/”表示“或”。

单相故障。基于准三相运行的改进跳合闸策略下，全线跳闸并闭锁重合闸的短路故障种类为47种，包括所有包含一对同名相及以上的接地故障和包含两对及以上同名相的不接地故障；不需重合进入准三相运行的短路故障种类为73种，包括所有不包含同名相的接地短路故障和一对同名相及以下的非接地故障。与传统跳合闸策略相比，改进跳合闸策略下需全线跳闸的故障种类大大减少，降低了同塔双回路短路故障后线路两端交流系统电气联系完全切断的可能性，绝大多数短路故障类型可通过跳闸策略直接进入准三相运行工况，有利于故障后系统稳定性的维持。

综上所述，基于准三相运行的同塔双回路准三相运行策略以故障后尽可能实现准三相运行为目的，与传统跳合闸策略相比，可降低故障后全线跳闸的可能性，并发挥线路准三相运行的优势，提高故障后的系统稳定性。

3 结 语

重新定义了同塔双回路准三相运行概念，验证了准三相运行的优势及可行性，提出了基于同塔双回路一体化的准三相跳合闸策略。通过仿真与理论计算，对准三相运行工况下的传输功率、过电流、不平衡度及线路温升进行了研究，论证了准三相运行的可行性及其优势。在此基础上，提出了基于准三相运行的同塔双回路改进跳合闸策略，以切除和重合最少故障线路为目的，实现准三相运行并尽可能减少重合于永久性故障的可能性。

参考文献

[1] 邹耀,陈卫,李世龙,等. 同杆双回路准三相运行与

跳合闸策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 137-142.

[2] Radojevic Z M, Shin J R. New Digital Algorithm for Adaptive Reclosing Based on the Calculation of the Faulted Phase Voltage Total Harmonic Distortion Factor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2007, 22(1): 37-41.

[3] 林达. 自适应重合闸和自适应电流保护技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.

[4] 王增平,刘浩芳,徐岩,等. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.

[5] 索南加乐,孙丹丹,付伟,等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.

[6] 李博通,李永丽. 基于故障点电压的单相自适应重合闸判据[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 86-91.

[7] 刘毅,张哲,尹项根,等. 同杆并架双回路自适应重合闸组合判据[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 56-61.

[8] 王慧芳,林达,何奔腾. 基于波形估计的带并联电抗器输电线路故障性质判别方法: CN103048567A [P]. 2013-04-17.

[9] 王庆庆,王慧芳,林达,等. 基于并联电抗器差模电流波形特征的三相自适应重合闸永久性故障识别[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1127-1132.

[10] 刘星,郭维雅,胡叶宾,等. 3/2接线方式同杆双回路准三相运行相关保护的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 32-35.

作者简介:

李世龙(1989),博士,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2019-01-06)