

一起因 500 kV 线路传输功率过大而导致 线路同频并网失败案例分析

罗义军,李飞,李超

(雅砻江流域水电开发有限公司,四川成都 610051)

摘要:文中通过分析某大型水电站在单条 500 kV 送出线路带大功率情况下,另一条线路同频并网失败的案例。简要地分析了影响同频并网的因素以及正在运行线路传输功率与同频合闸相角差之间关系,进而提出解决大功率同频并网失败的措施。

关键词:同频并网;线路传输功率;相角差

中图分类号:TM 76 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)04-0091-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220418

Case Analysis of Same-frequency Paralleling Failure Caused by Excessive Transmission Power of 500 kV Line

LUO Yijun, LI Fei, LI Chao

(Yalong River Hydropower Development Company Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China)

Abstract:In the case of a single 500 kV transmission line with high power, the same-frequency paralleling failure of another line is analyzed. The factors affecting the same-frequency paralleling are briefly analyzed as well as the relationship between the transmission power of the running line and the phase-angle difference in the same-frequency switching, and then the measures to solve the same-frequency paralleling failure with high power are put forward.

Key words: same-frequency paralleling; line transmission power; phase-angle difference

0 引言

某大型水电站(以下简称 A 水电站)装机 6 台,单机容量为 600 MW,总装机容量为 3600 MW。A 水电站 500 kV 电气一次设备由 500 kV GIS、500 kV GIL 及其附属设备组成,主接线采用 4/3 和双断路器的混合接线方式。3 回出线至某换流站(以下简称 B 换流站),线路长度为 81 km,其中 500 kV I、II 线为同塔双回线路,另外还有单独的某 III 线。

2020 年 1 月 9 日,500 kV I、II 线停电检修完成,等待调度命令合环,此时,A 水电站 5 台机组运行,总功率为 2400 MW,系统采用 500 kV III 线单回线路送出 2400 MW。

500 kV I 线由 B 换流站侧充电正常后,A 水电站侧自动同期装置因相角差无法满足并网条件,导致线路两侧中断路器均合闸失败。经检查发现线路

与主变压器高压侧相角差为 $\pm 12^\circ$ 左右,而同期装置相角差定值为 $\pm 10^\circ$,同期合闸相角差不满足定值要求,是同期合闸失败的主要原因,而以往线路正常同期合闸时的相角差通常小于 $\pm 1^\circ$ 。

下面将探讨分析造成同期合闸相角差变大的原因,并采取措施减小同期并网相角差,成功实现同期并网,进而探讨影响同频并网的因素。

1 同频并网与差频并网概述

目前,根据并网的应用场景不同,电力系统将并网操作分为同频并网和差频并网。

同频并网是指同步点两侧的系统已经存在着电气联系,只是通过并网操作再增加一条回路的操作。例如已经并网运行的系统,再增加一条送出线路或者开环系统的合环操作。其主要特点是同步点两侧系统频率相同,但可能存在一定的电压幅值差,并且

存在着一个固有的相角差。这是因为并网前两侧频率相同,但在实现并网前并网两侧电压幅值可能不同,而且两侧会出现一个功角。并网条件是当并网断路器两侧的电压差及功角在给定范围内时,即可实施并网操作。完成并网后,并网断路器两侧的功角消失,系统潮流将重新分布。

差频并网是指将两个在电气上没有联系的系统同步并网,如发电机准同期并网或者两个解列运行的系统通过一回线路重新联接;其特点是在同步点两侧系统之间不仅存在着电压差、相角差,同时也存在着频率差。由于有频率差的存在,同步点两端的功角差处在一个动态变化过程中,此时要求在电压、频率满足要求的前提下同期装置捕捉相角差为 0 的时机完成并网操作。

2 功率、相角差及同频并网三者的关系

2.1 超高压线路功角特性

假设超高压线路为均匀长线路,其等值电路如图 1 所示。

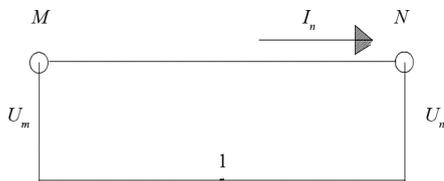


图 1 超高压长线路等值电路

假设线路首端为 M , 末端为 N , 线路全长为 l , 以末端电压、电流为参考电压、电流, 超高压长线路电压的分布方程为^[1]

$$U_m = U_n \cosh \gamma l + I_n Z_c \sinh \gamma l \quad (1)$$

式中: U_m 为首端电压; U_n 为末端电压; I_n 为末端电流; Z_c 为线路波阻抗; γ 为线路的传播常数。

由于输电线的电阻与感抗之比以及电导与电纳之比均随输电电压的提高而减小, 超高压输电线路的正序电抗一般是电阻的 10~20 倍, 通常可以忽略不计, 即将其视为无损线^[2], 无损线的波阻抗和传播常数表达式分别为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

$$\gamma = j\omega \sqrt{LC} = j\beta \quad (3)$$

式中, L 、 C 分别为输电线路单位长度的电感和电容。

由式(1)、式(2)、式(3)可得

$$U_m = U_n \cos \theta + j I_n Z_c \sin \theta \quad (4)$$

式中, $\theta = \beta l$ 。

所以由式(4)可得超高压线路的相量图, 如图 2 所示。

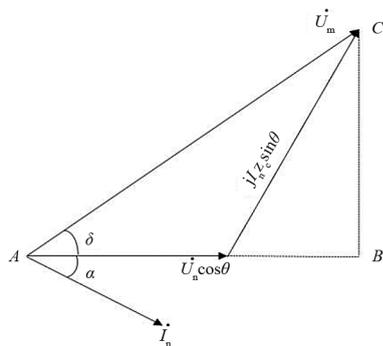


图 2 超高压线路相量

图 2 中, δ 为超高压输电线路的功角, 即首端电压超前于末端电压的角度; α 为末端电压超前末端电流的角度。

所以, 由图 2 可得超高压线路的功角特性方程为

$$U_{BC} = I_n Z_c \sin \theta \cos \alpha = U_m \sin \delta \quad (5)$$

可得:

$$I_n \cos \alpha = \frac{U_m \sin \delta}{Z_c \sin \theta} \quad (6)$$

$$P_n = U_n I_n \cos \alpha = U_n \frac{U_m \sin \delta}{Z_c \sin \theta} \quad (7)$$

式中, P_n 为超高压线路传输功率。

2.2 功率、相角差及同频并网三者的关系

同频并网就是在已经有了电气连接的两个系统间, 再增加一回联接线路, 如图 3 所示。在所有边断路器合闸时, 在 III 线将发电侧与电力系统相连接的情况下, 投入 I 线, 此时在 E 或 F 断路器两侧电压幅值不同、频率相同, 且两侧电压间存在一个相角差。假设选取 E 断路器作为并网点, 相角差实质就是正在运行的 III 线的功角 δ , δ 的取值范围 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

所以由式(7)可得

$$P = \frac{U_1 U_5}{Z_c \sin \theta} \sin \delta \quad (8)$$

式中: U_1 为 I 线的线路电压; U_5 为 5B 高压侧电压或者母线电压; P 为 III 线传输的有功功率; $Z_1 = Z_c \sin \theta$, 为 III 线的阻抗。

由此可知, 线路传输功率 P 与功角 δ 的关系为正弦函数关系, 从理论上来说, 功角 δ 的取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 因此, 当传输功率 P 及阻抗 Z_1 越大, 则功角

δ 越大。无论是合环还是开环操作,都会改变系统的潮流分布。当合环时,新投入的线路总是会分担一定的负荷,在新线路中形成冲击电流。但是这与差频并网不同,新投入的线路承担负荷是增加线路投入的目的,形成冲击也是不可避免的。

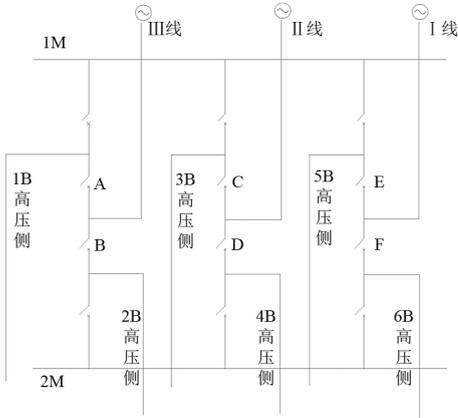


图 3 500 kV 主接线

同频并网的条件与差频并网要求电压、频率、相角 3 个参数都相同的条件不同,因为同频并网的功角是固定的(相对差频并网的功角随时间变化而言),不存在差频,只是需要检测两侧电压差。也就是说,相对于差频并网,同频并网必然存在电压差和相角差,能否并网成功,只是比较两侧电压差与功角的大小而已;电压差决定了无功功率通过新投入线路的潮流冲击大小,功角 δ 决定了有功功率和无功功率通过新投入线路的潮流冲击大小,这种冲击实质是系统潮流的突变性瞬时再分配。这种冲击形成的巨大冲击电流可能造成继电保护装置的动作跳闸,导致线路并网失败。

3 案例分析

所述案例中,A 水电站 5 台机组运行,总功率为

2400 MW,开关站所有边断路器合闸,系统采用 500 kV III 线单回线路送出 2400 MW。500 kV I 线由 B 换流站侧充电正常后,A 水电站侧自动同期装置因相角差无法满足并网条件。通过故障录波曲线,能够得到此时 500 kV I 线电压与 A 水电站 5 号主变压器(5B)高压侧电压(即 1M 电压)的相角差和电压差,如图 4 所示。

由图 4 可知,500 kV I 线电压与 A 水电站 5 号主变压器(5B)高压侧电压(即 1M 电压)的相角差为 11° 左右(其中 $\delta_a = 11.177^\circ$ 、 $\delta_b = 11.002^\circ$ 、 $\delta_c = 10.978^\circ$),而电压差小于 2 kV(其中 A、B、C 相电压差分别为 0.305 kV、1.401 kV、0.098 kV),可以忽略电压差。而同频并网相角差的定值为 10° ,正常情况同频并网相角差小于 1° ,根据式(8)可知,影响相角差的因素有线路输送功率 P 、500 kV I 线的线路电压 U_1 、5B 高压侧电压或者母线电压 U_5 、500 kV III 线的阻抗 Z_1 ,在当前状态下同频并网时,500 kV I 线的线路电压 U_1 、5B 高压侧电压或者母线电压 U_5 、500 kV III 线的阻抗 Z_1 等参数不变,将其作为一个参数,即 $K = \frac{U_1 U_5}{Z_c \sin \theta}$,所以:

$$P = K \sin \delta \tag{9}$$

将 $P=2400 \text{ MW}$, $\delta=11^\circ$ 代入可得 $K=12\ 578.02 \text{ MW}$ 。

根据式(8)可知,要使 500 kV I 线并网成功,可以采取以下措施:

- 1) 减小 500 kV I 线电压与 A 水电站 5 号主变压器(5B)高压侧电压的相角差至定值 10° 以下。为防止并网冲击电流过大,最好将相角差减小至尽量小,因此必须将线路输出功率减小,但考虑涉及电网调度出力的调减,不宜将输出功率减少过多。当相角差为 10° 时,由式(9)可得 $P=2184 \text{ MW}$ 。

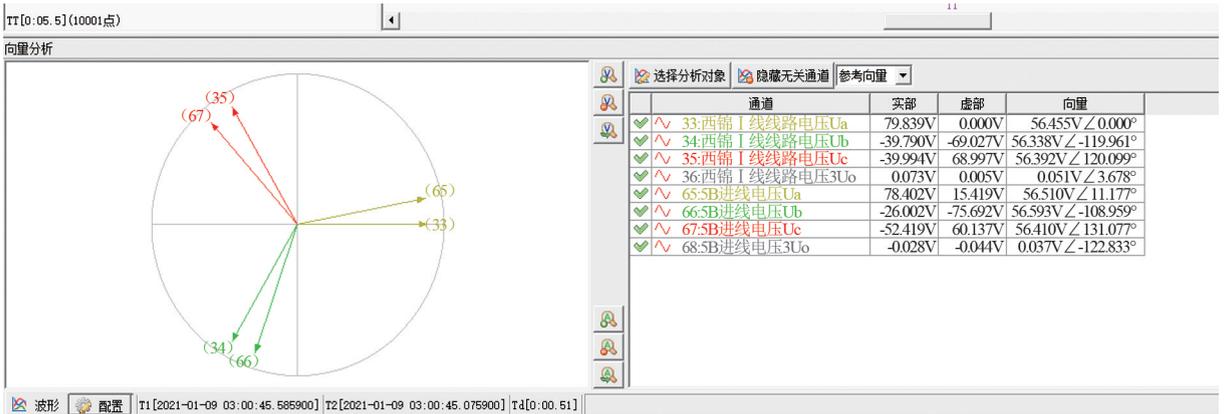


图 4 并网失败两侧相角关系

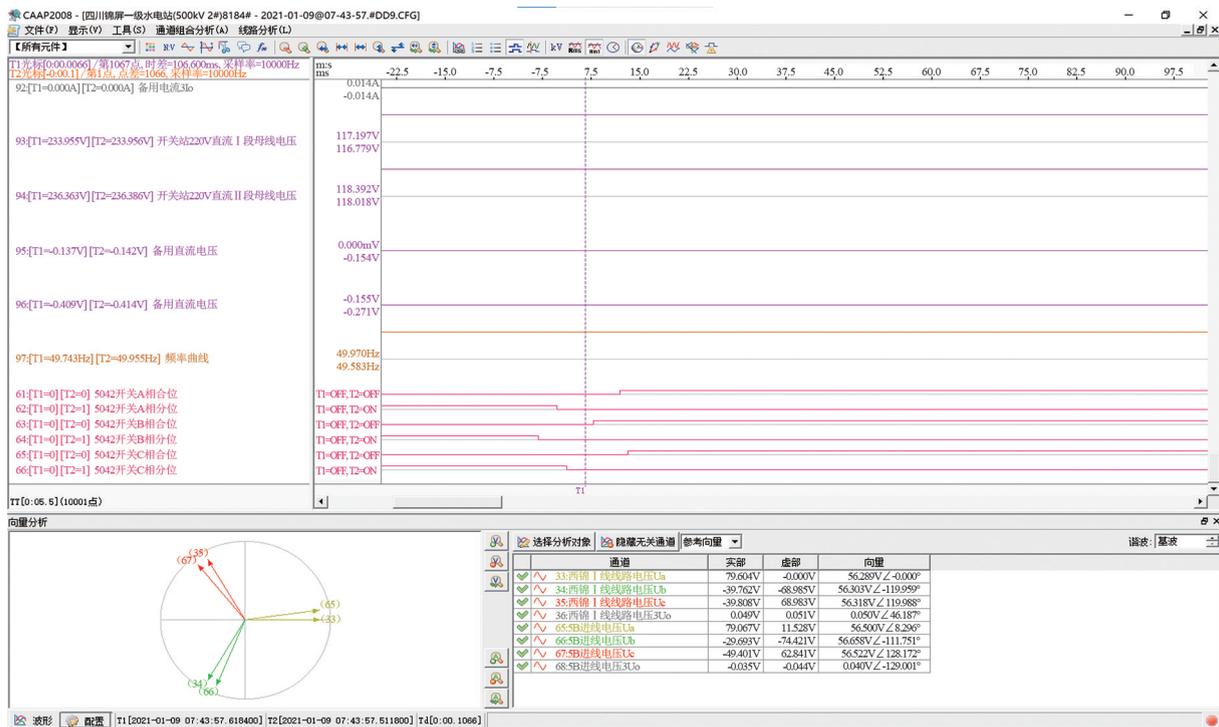


图 5 并网成功瞬间两侧电压相量

δ 由 $0^\circ \sim 10^\circ$ 变化时,各值对应的有功功率如表 1 所示。

表 1 相角差与有功功率的关系

$\delta / (^\circ)$	P / MW	$\delta / (^\circ)$	P / MW
1	219	6	1314
2	439	7	1533
3	658	8	1750
4	877	9	1936
5	1096	10	2184

考虑到单机容量为 600 MW,结合表 1,最好将输出功率调减 600 MW 左右。

2) 提高同频并网相角差定值。由于定值提高后,并网瞬间的冲击电流会比较大,此措施可能会造成继电保护设备误动,将刚并网的 500 kV I 线跳闸,甚至又造成在运行的 500 kV III 线跳闸,造成全厂失电的风险,因此建议不采用。

由上可得,面对线路输送功率较大引起的并网相角差大于定值的情况,最好采取调减负荷的方式来实现同频并网。

当调减 600 MW 负荷使输出功率为 1800 MW 时,500 kV I 线并网一次成功,其并网瞬间波形及两侧电压相量如图 5 所示。

由图 5 可得,并网瞬间各相相角差为 $\delta_a = 8.296^\circ$ 、 $\delta_b = 8.208^\circ$ 、 $\delta_c = 8.184^\circ$ 。

由此可以进一步验证输送有功功率与功角之间的正弦函数关系。

4 结论

在同频并网中,影响并网成功的因素有同步点两侧相角差和电压差。而在稳定的电力系统中,两侧电压趋于一致,电压差较小,对于同频并网的影响较小。相角差可以认为是合环点另外正在运行的半环的功角,其大小与系统阻抗和传输功率有关,代表了并网瞬间潮流再分配和并网冲击的大小。对于确定的将要并网系统,由于系统阻抗确定,功角差只受正在运行线路传输功率的影响。当线路传输功率较大,从而引起相角差超过同频并网功角定值,导致同频并网失败。因此,这种情况下最好采取调减传输功率的方式来解决并网失败的问题。

参考文献

- [1] Prabha KUNDUR. 电力系统稳定与控制[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [2] Carson WTAYLOR. 电力系统电压稳定[M].北京:中国电力出版社,2002.

作者简介:

罗义军(1996),男,助理工程师,主要从事水电站检修维护工作。

(收稿日期:2021-12-30)