石油炼厂电气合环倒闸操作的条件判断

合环操作一般为倒闸操作的风险点，环流过大会引起继电保护装置动作造成合环失败或者停电事故。讨论了合环后暂态电流及稳态电流对继电保护的影响，并利用叠加定理，根据合环前各个节点的电流大小，推算合环后稳态电流的大小，为石油炼厂电力系统安全稳定运行提供帮助。

蔡 楠/中国石油大连石化公司供电车间

蔡 楠/工程师

关键词/Keywords
合环·
继电保护·
暂态·
稳态·
环流·

0 引言

在倒闸操作中经常能遇到在6(10) kV分段的合环、解环操作。执行合环操作时，由于开关两侧电压差的存在，在合环的网络中会产生环流。以大连石化电力系统为例，环流出现在由区域所6(10) kV分段开关、区域所主变压器、66(35) kV线路、石化变电所主变压器和石化变电所220 kV分段所组成的环中，如图1所示。

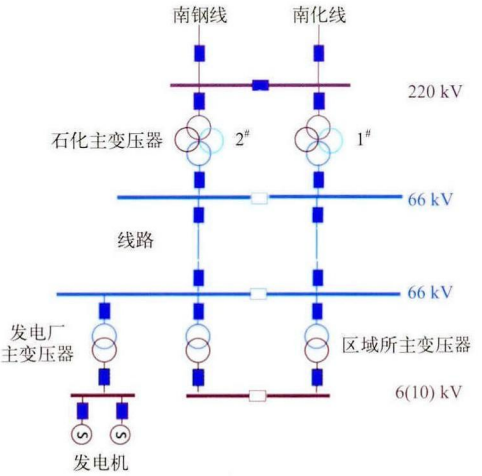

图1 大连石化电力系统示意图

由于合环时可能造成电流保护动作，所以合环前必须对将要合环的网络是否能够合环进行严格的判断，避免电流保护动作造成停电。目前经常采用的方式是停止主变压器的过电流保护，只留下一个主变压器过电流保护跳变压器开关的出口以备在环流过大时切除故障。该方法简单有效，但倒闸操作步骤较多，增加操作风险，而且在环流过大时会使主变压器跳闸，虽能保证不间断供电，但对整个电力系统也有冲击，造成电压波动。

本文旨在判断在系统运行方式改变时，不同负荷情况下的环流大小，结合合环的暂态过程与稳态过程的分析，探索合环的判断条件，达到直接经过简单计算就可以判断出是否可以直接合环的目的。

1 合环分析

1.1 合环电流

由叠加定理可知，合环后的稳态电流由合环前的馈线电流与合环环流叠加而成[1]。所以说，环流的组成为两部分：①电压差产生暂态电流，也可以叫冲击电流；②合环后潮流（负荷）重新分配产生的稳态电流。

1.2 环流的影响

环流的影响主要在两方面：①对系统有冲击，造成故障录波器动作，电压不稳，易造成低压接触器脱扣，低压负荷跳闸，进而联锁高压负荷跳闸，影响生产；②对继电保护造成影响，大部分时候合环失败的主要原因都是合环产生的环流造成继电保护动作。

国家电网调度实际操作中，合环必

须满足下述要求：①合环点两端相位一致；②合环点两端的最大允许电压差（绝对值）为20%，特殊情况下，环状并列最大电压差不应超过30%；③合环点两端电压相角差不超过20°。

但是该规定并未经过严格的分析论证。也有案例显示存在已满足该条件，由于潮流变化造成线路过负荷，合环、解环依然失败的操作。而且国家电网与石油炼厂电力系统在规模及复杂程度上差别很大，该规定是否适合企业内部的倒闸操作还有待商榷。

所以，正确判断环流大小应是判断能否合环的关键。电流式继电保护一般为速断和过电流，大连石化电力系统过电流时限最小为0.4 s，由于环流由暂态电流和稳态电流组成，所以以下将讨论这两部分电流对继电保护的影响。

2 暂态环流

环流的暂态电流即合环暂态时的非周期分量，非周期分量I_{ap}为一衰减量，如下式所示

$$I_{ap}=-I_e\sin(\alpha-\varphi)e^{\frac{-t}{T}} \quad (1)$$

式中，α为合环时联络开关两侧的电压相角差；φ为合环环路阻抗角；t为非周期分量衰减时间；T为时间常数，并且$T=L/R=X/(\omega R)$，R、L和X分别为合环环路的电阻、电感和电抗，$\omega=2\pi f$，$f=50$ Hz。当$t=2T$时，$e^{\frac{-t}{T}}=0.135$，所以认为$t=2T$时衰减基本结束，合环过程进入稳态。

所以在时限上，合环的暂态电流不会对过电流保护产生影响，一般在0.2 s以内合环的暂态冲击电流已经衰减完毕。

合环后，两侧母线在分段处可能出现的最大冲击电流为合环前的稳态电流与两侧电压差引起的环流之和，电压差产生的冲击电流一般为稳态电流的1.62倍[1]，这在数值上比速断保护要小很多，因此合环的暂态电流对线路的速断保护也不会造成影响。

3 稳态电流

以大连石化电力系统为例，合环的稳态电流是在区域所6 kV分段开关、区域所主变压器、66(35) kV线路、石化变电所主变压器、石化变电所220 kV分段所组成的环中流过的负荷电流，由于大连石化的220 kV两条进线并列运行，这样，石化变电所1#、2#主变压器一次电压、相角相同，两台主变压器相当于一条电源。反映到66(35) kV、6 kV侧分列运行的两段母线之间的电压差基本上都是由于负荷不均引起的，即负荷大的电压低，负荷小的电压高。

当合上区域所6 kV分段开关时，系统中的负荷将重新分配，只要已知环中设备的阻抗，根据欧姆定理及叠加原理，就能估算出环中流过某一回路的电流大小。考虑发电机对负荷的影响，要根据发电机运行状态，在石化变电所66 kV母线上将运行的发电机阻抗并联计算。

根据如图2所示典型的分列运行系统图，一般6 kV分段合环处电流容易引起6 kV分段、区域所主变压器的过电流保护误动作，因为再上级的过电流保护无论时限还是数值都要大于区域所主变压器及分段的过电流定值，所以接下来将推导合环后6 kV分段处的电流。

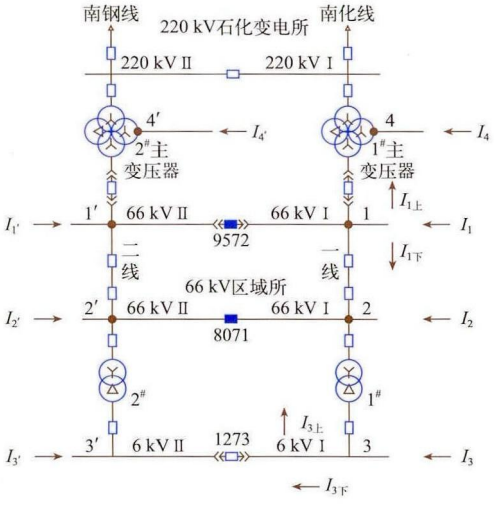

图2 典型的在6 kV分段合环的系统图

3.1 6 kV分段稳态电流的计算

根据图1典型的6 kV分段合环的系统图，首先将不同电压等级的电流归算至6 kV电压等级的电流；定义负荷侧→电源侧为电流的正方向。

合环前，南钢线、南化线总电流$I_{总}=I_1+I_2+I_3+I_4+I_{1'}+I_{2'}+I_{3'}+I_{4'}$，即总电流为两侧的所有负荷电流之和。当6 kV分段开关1273合上后，系统中的潮流发生了变化。以节点1为例，合环前，石化变电所66 kV Ⅰ段母线上所有电流经1#主变压器二次侧开关向电源侧（向上）流出。合环后，对于节点1来说多了一路电源，所以66 kV Ⅰ段母线上的电流I_1分为两部分，$I_{1上}$向上经1#主变压器流过南化线电源，$I_{1下}$向下经一线、区域所1#主变压器、6 kV分段、区域所2#主变压器、二线、2#主变压器流过南钢线，同理，电流I_2、I_3和I_4也分为两部分，分别流向两侧电源（图中向上或者向下）。

所以，计算6 kV分段电流的问题，就转化为分别考虑图中每一路电流对6 kV分段的影响，利用叠加定理相加得到6 kV分段的稳态环流。公式如下

$$I_{6kV分段}=I_{1下}+I_{2下}+I_{3下}+I_{4下}-I_{1'下}-I_{2'下}-I_{3'下}-I_{4'下} \tag{2}$$

根据欧姆定理，求$I_{1下}$、$I_{2下}$、$I_{3下}$、$I_{4下}$、$I_{1'下}$、$I_{2'下}$、$I_{3'下}$和$I_{4'下}$，得

$$I_{1下}=\frac{Z_{220}+Z_{66}}{Z_{\Sigma}}\times I_1 \tag{3}$$

$$I_{2下}=\frac{Z_{220}+Z_{66}+Z_L}{Z_{\Sigma}}\times I_2 \tag{4}$$

$$I_{3下}=\frac{Z_{220}+Z_{66}+Z_L+Z_T}{Z_{\Sigma}}\times I_3 \tag{5}$$

$$I_{4下}=\frac{Z_{220}}{Z_{\Sigma}}\times I_4 \tag{6}$$

$$I_{1'下}=\frac{Z_{220}+Z_{66}}{Z_{\Sigma}}\times I_{1'} \tag{7}$$

$$I_{2'下}=\frac{Z_{220}+Z_{66}+Z_L}{Z_{\Sigma}}\times I_{2'} \tag{8}$$

$$I_{3'下}=\frac{Z_{220}+Z_{66}+Z_L+Z_T}{Z_{\Sigma}}\times I_{3'} \tag{9}$$

$$I_{4'下}=\frac{Z_{220}}{Z_{\Sigma}}\times I_{4'} \tag{10}$$

式中，Z_{220}为石化变电所主变压器一次阻抗；Z_{66}为石化变电所主变压器二次阻抗；Z_L为线路阻抗；Z_T为区域所主变压器阻抗；Z_{Σ}为环中的总阻抗，即2倍的$Z_{220}+Z_{66}+Z_L+Z_T$。

因为是估算，可以使两边的阻抗近似看成相等，所以将式（3）～式（10）带入式（2），整理得

$$I_{6kV分段}=\frac{Z_{220}(I_1+I_2+I_3+I_4-I_{1'}-I_{2'}-I_{3'}-I_{4'})+Z_{66}(I_1+I_2+I_3-I_{1'}-I_{2'}-I_{3'})+Z_L(I_2+I_3-I_{2'}-I_{3'})+Z_T(I_3-I_{3'})}{Z_{\Sigma}} \tag{11}$$

从式（11）可以看出，$I_1+I_2+I_3+I_4-I_{1'}-I_{2'}-I_{3'}-I_{4'}$等于合环前石化变电所1#主变压器主一次与2#主变压器主一次电流的差值，$I_1+I_2+I_3-I_{1'}-I_{2'}-I_{3'}$等于合环前石化变电所1#主变压器主二次与2#主变压器主二次电流的差值，$I_2+I_3-I_{2'}-I_{3'}$为一线与二线电流的差值，$I_3-I_{3'}$为区域所1#主变压器与2#主变压器电流的差值，所以式（11）可以化简为

$$I_{6kV分段}=\frac{Z_{220}I_{220主一次电流差}+Z_{66}I_{220主二次电流差}+Z_LI_{线路电流差}+Z_TI_{区域所主变压器二次电流差}}{Z_{\Sigma}} \tag{12}$$

所以，式（12）为合环后6 kV分段的稳态电流的计算公式。

3.2 实例计算

2015年11月16日11：21：03：841，新区重整变电所6 kV分段合环前各节点电流数据如表1和表2所示。

将上述数据代入式（11），得$I_{6kV分段}$=[(0.082 2×－120.63－0.004 9×－341＋0.002 7×484＋0.436×506)/1.032] A＝207 A。

根据后台监控显示的当日11：22：12：448至11：26：35：900时间段内，6 kV分段合环后的电流为189～237 A之间，计算环流在此范围内。

该计算并没有考虑发电机的存在，因为实际计算中，1#、3#、4#和2#发电机的阻抗分别为0.814、0.390 4、0.386 7和0.386 7，即使加上线路阻抗，与石化变电所1#、2#主变压器二次的阻抗并

表1 重整6 kV分段合环前电流数据

（单位：A）

石化变电所				开关站		重整	
1#主变压器一次	201.58	1#主变压器二次	409	化新一线	319	1#主变压器二次	987
2#主变压器一次	204.87	2#主变压器二次	440	化新二线	275	2#主变压器二次	481
电流差	−3.29	电流差	−31	电流差	44	电流差	506
6 kV归算	−120.63	6 kV归算	−341	6 kV归算	484	6 kV归算	506

表2 系统阻抗数据

Z_{220}	Z_{66}	Z_L	Z_T	Z_Σ
0.082 2	−0.004 9	0.002 7	0.436	1.032

联后，依然约等于−0.004 9，所以估算中可以不考虑发电机的影响。

4 结束语

通过上文分析，合环暂态电流对速断和过电流保护的影响很小，合环时可不做考虑。但在石化变电所配出线路合环时，电业局要求必须停止线路速断保护，也要依照此要求执行。稳态电流的大小可通过推导出的式（11）估算，以此来判断是否需要停止相关保护或合上级分段，以达到减少倒闸操作风险的目的。

参考文献

[1] 葛少云，李晓明.基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报，2007，19 (6)：124-127.

（收稿日期：2016−11−08）EA

(上接第36页)

1）TA的选型不应只考虑满足电流比精确度的要求，应考虑短路电流因素造成TA饱和的影响，安装调试时应对TA做伏安特性试验、保护回路负载阻抗试验和饱和试验，根据试验情况采取措施减小保护回路负载阻抗值、适当增大TA电流比或容量，防止TA饱和。

2）线路过电流保护应考虑电动机再起动电流因素的影响。应采取措施躲过因主保护切除短路电流后，电动机再起动造成线路过电流保护动作，致使停电范围扩大。

3）企业应了解地方电网继电保护定值情况，对直接给企业供电的外线路过电流保护定值应进行核算，不合理部分应向地方供电部门提出整改建议或要求，防止此类保护越级跳闸而造成大面积停电，给企业带来损失。

参考文献

[1] 刘卓敏，侯德明. 电力系统分析 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2009.

[2] 覃燕凤. CT饱和特性对继电保护的影响分析 [J]. 电气开关，2013 (3)：96-99.

[3] 侯太明，黄文龙. 10 kV线路CT饱和状态分析 [C]. 长沙：第四届输配电技术国际会议，2003：766-770.

[4] 肖建. 电动机在电压波动状态下的运行分析及计算 [J]. 电气传动，2013 (增刊1)：154-157.

[5] 张吕根. CT饱和对继电保护动作的影响分析 [J]. 继电器，2003 (8)：21-25.

[6] 杨红，等. 电力系统继电保护 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2009.

[7] 狄富清，狄晓渊. 10/0.4 kV配电设备继电保护实用技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2014.

[8] 电力行业继电保护标准化委员会. DL/T 995—2006 继电保护和电网安全自动装置检验规程 [S]. 北京：中国电力出版社出版，2006.

（收稿日期：2016−09−12）EA