

发变组主变高压侧非全相运行电气特征及其对保护的影响

曹雪兰¹, 李本瑜², 沈燕华¹, 陈海龙¹, 卢金龙¹, 刘艳东¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 针对发电厂主变高压侧出线发生单相或两相接地故障, 故障相切除后等待重合闸过程或主变高压侧出线一相或两相断线, 发变组处于非全相运行状态, 利用序分量法分析发电机机端电压、电流的特征, 并根据录波数据进行验证, 提出发变组非全相运行对发变组继电保护的影响。根据分析结果, 提出发电机组在非全相运行时的注意事项及防范措施, 保证发电机组安全可靠运行。

关键词: 非全相; 断线; 重合闸; 序分量

Electrical characteristics of generator transformer high voltage side on open phase operation and its effect on protection

CAO Xue-lan¹, LI Ben-yu², SHEN Yan-hua¹, CHEN Hai-long¹, LU Jin-long¹, LIU Yan-dong¹

(1. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. Yunnan Electric Power Dispatching Center, Kunming 650011, China)

Abstract: When the power transformer high voltage side outgoing line occurs single-phase or two-phase ground fault, in the process awaiting reclosing after the fault phase is cut off or the main transformer high voltage side outgoing line occurs one or two phase broken, generator transformer group is in the open phase running state. This paper analyzes the characteristics of voltage and current of generator using sequence component, verifies the analytical results according to the recorded data, and proposes the effect on generator transformer relay protection. According to the results of the analysis, it puts forward some attention and prevention measures on open phase operation, which is conducive to the safe and reliable operation of power system.

Key words: open phase; break; reclosing; sequence component

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0034-05

0 引言

主变高压侧非全相是指输电线或变压器切除一相或两相的工作状态, 例如: 线路单相接地短路后, 故障相断路器跳闸; 导线一相或两相断线; 断路器在合闸过程中三相触头不同时接通等。我们知道, 电力系统三相阻抗等对称性的破坏, 将导致三相电流和三相电压对称性的破坏, 因而会出现负序电流; 当变压器的中性点接地时, 还会出现零序电流^[1]。当负序电流流过发电机时, 三相负序电流在发电机定子转子气隙间产生反向同步旋转磁场, 转子则正向同步速旋转, 所以转子相对于负序旋转磁场有两倍同步速, 在转子表层感生倍频电流, 后者在转子端部护环与转子本体之间、槽楔与槽壁之间的接触面上、槽楔连接区、阻尼环和阻尼条等分流较大的部位形成局部高温, 灼伤转子, 如果转子本体与护环的温差过大, 还可能致护环松脱, 造成机组严重破坏^[2]。主变高压侧非全相运行, 也会对机组继

电保护产生影响^[3-4]。

1 Y₀/Δ-11 变压器两侧电压、电流向量关系

电压、电流对称分量经变压器后, 不但数值大小要发生变化, 而且它们的相位也要发生变化。变压器两侧电压、电流的大小由变压器变比决定, 而相位关系则与变压器的联接组别有关。发电厂升压变压器一般采用Y₀/Δ-11的联接组别, 其接线图如图1所示。

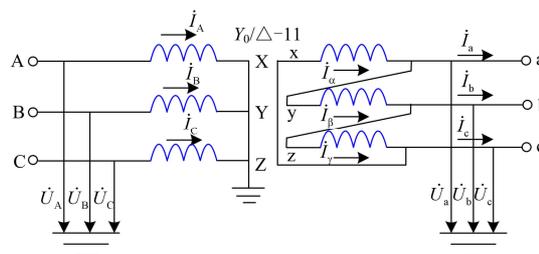


图1 Y₀/Δ-11变压器接线图

Fig. 1 Connection diagram of Y₀/Δ-11 transformer

图1中的 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 、 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 为Y侧的相电压、电流； \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 、 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 为△侧相电压、电流。

假设变压器变比为 n ，根据变压器传变关系及序分量法^[5]有如下关系：

$$\begin{cases} \dot{U}_{a1} = \frac{\dot{U}_{A1} e^{j30^\circ}}{n}, \dot{I}_{a1} = n \dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} \\ \dot{U}_{a2} = \frac{\dot{U}_{A2} e^{-j30^\circ}}{n}, \dot{I}_{a2} = n \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ} \\ \dot{U}_{a0} = 0, \dot{I}_{a0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

对于 $Y_0/\Delta-11$ 变压器，在 Y 侧加入正序电压或正序电流时，△侧电压或电流的相位超前 Y 侧正序电压或电流 30° ；在 Y 侧加入负序电压或负序电流时，△侧电压或电流的相位滞后 Y 侧负序电压或电流 30° ；在 Y_0 侧加入零序电压或电流时，△环内会有零序，但是在△侧引出线上无零序电压或零序电流。

2 高压侧非全相运行时变压器各侧电流电压特征

下面以高压侧 C 相非全相进行分析，其他相类似。 $Y_0/\Delta-11$ 接线变压器 Y_0 侧 C 相断线电流分布图如图 2 所示。

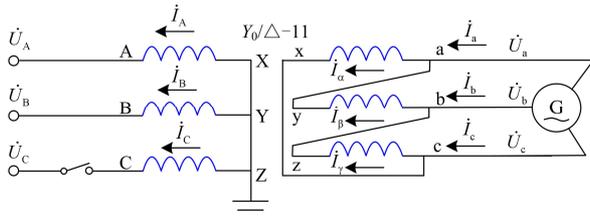


图 2 $Y_0/\Delta-11$ 接线变压器 Y_0 侧 C 相断线电流分布图

Fig. 2 Current distribution diagram on Y_0 side of $Y_0/\Delta-11$ transformer with phase C broken

2.1 高压侧电压、电流特征

$Y_0/\Delta-11$ 接线的变压器高压侧母线有其他电源，如果一相断线不接地，断线相电流接近于 0，两健全相电流相等；高压侧电压变化不大（故障相电压略高于健全相电压），PT 开口三角电压接近于 0。

高压侧出现非全相运行时，如图 2 中 C 相断线，在此情况下， \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 认为仍然为负荷电流，而 $\dot{I}_C = 0$ ，利用序分量分析法得到高压侧 A 相的各序电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_{A1} = \frac{\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C}{3} = \frac{\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B}{3} = \frac{2\dot{I}_A}{3} \\ \dot{I}_{A2} = \frac{\dot{I}_A + \alpha^2 \dot{I}_B + \alpha \dot{I}_C}{3} = \frac{\dot{I}_A + \alpha^2 \dot{I}_B}{3} = \frac{\dot{I}_A e^{j60^\circ}}{3} \\ \dot{I}_{A0} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{3} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B}{3} = \frac{\dot{I}_A e^{-j60^\circ}}{3} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(3)可以做出高压侧电流各相序相量图，如图 3 所示。

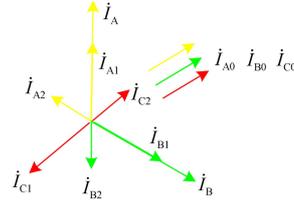


图 3 C 相断线高压侧各相序相量图

Fig. 3 Phasor diagram for high voltage side each phase with phase C broken

2.2 高压侧非全相运行时主变低压侧电流特征

利用前面分析的高压侧电流各相序分量，根据式(1)、式(2)可得到低压侧电流各序分量，再合成即可得到低压侧的电流，零序只在△内环流，出线电流中没有零序电流分量，因此可以不考虑零序电流。

低压侧正、负序电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = n \dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} = n \frac{2\dot{I}_A}{3} e^{j30^\circ} \\ \dot{I}_{a2} = n \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ} = n \frac{\dot{I}_A}{3} e^{j30^\circ} \end{cases} \quad (3)$$

各序分量求出来以后，根据对称分量的合成公式可求出低压侧的各相电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = n \dot{I}_A e^{j30^\circ} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} = \alpha^2 \dot{I}_{a1} + \alpha \dot{I}_{a2} = \frac{\sqrt{3}}{3} n \dot{I}_A e^{j240^\circ} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} = \alpha \dot{I}_{a1} + \alpha^2 \dot{I}_{a2} = -\frac{\sqrt{3}}{3} n \dot{I}_A \end{cases} \quad (4)$$

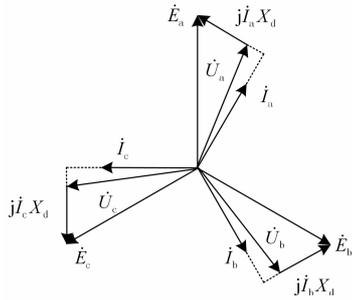
由式(4)中可以看出，高低压侧电流的相位关系： \dot{I}_a 超前 \dot{I}_A 30° ， \dot{I}_b 与 \dot{I}_B 同向；低压侧各相电流的相位关系： \dot{I}_a 超前 \dot{I}_b 150° ， \dot{I}_b 超前 \dot{I}_c 60° ， \dot{I}_c 超前 \dot{I}_a 150° 。A 相电流大小不变，B、C 相电流大小变为断线前的 $\frac{\sqrt{3}}{3}$ 倍。

2.3 高压侧非全相运行时主变低压侧电压特征

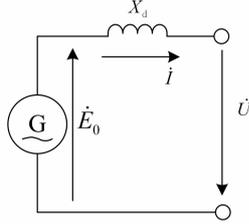
由三相同步发电机规定的正方向, 可得电枢绕组任一相的电动势方程为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}X_d \quad (5)$$

由式(5)作出同步发电机向量图和等效电路如图4所示。



(a) 隐极同步发电机三相向量图



(b) 隐极同步发电机等效电路

图4 同步发电机向量图和等效电路

Fig. 4 Synchronous generator vector diagram and equivalent circuit

假设在变压器高压侧 C 相断线非全相运行时, 发电机励磁电流等参数不变, 即发电机的磁感应电动势 \dot{E}_0 不变, 由式(5)可知, 机端电压与发电机电流和发电机同步电抗以及功角有关。

根据式(5)可计算得到发电机机端各相电压为

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{E}_a - j\dot{I}_a X_d \\ \dot{U}_b = \dot{E}_b - j\dot{I}_b X_d \\ \dot{U}_c = \dot{E}_c - j\dot{I}_c X_d \end{cases} \quad (6)$$

前面分析得到 \dot{I}_a 不变, 因此 A 相电压 \dot{U}_a 也不变; B 相电流与非全相运行前相比, 相角滞后 30° , 大小变为 $\frac{\sqrt{3}}{3}$, 根据式(6)可得到 B 相电压 \dot{U}_b , \dot{U}_b 相对非全相运行前电压 \dot{U}_b' , 相角超前一定角度, 幅值将变小; C 相电流与非全相运行前相比, 相角超前 30° , 大小变为 $\frac{\sqrt{3}}{3}$, 根据式(6)可得到

C 相电压 \dot{U}_c , \dot{U}_c 相对非全相运行前电压 \dot{U}_c' , 相角超前一定角度, 幅值将变大。C 相非全相运行时, 机端电压向量图如图5所示。

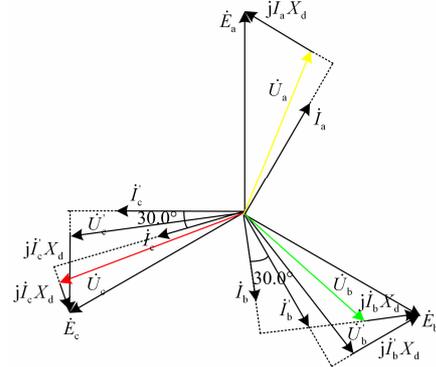


图5 C相非全相运行时机端电压向量图

Fig. 5 Vector diagram of generator terminal voltage with C phase open

根据式(6), 要计算出非全相运行时, 机端电压向量, 需要发电机电势、电流以及阻抗等参数, 图5仅画出了发电机机端电压的变化趋势, 由图5可知, 高压侧 C 相非全相运行时, 机端 A 相电压不变, B 相电压 \dot{U}_b 小于正常时的电压, C 相电压 \dot{U}_c 大于正常时的电压, 即 C 相非全相时机端电压大小关系为 $U_c > U_a > U_b$, \dot{U}_a 超前 \dot{U}_b 角度小于 120° , 而 \dot{U}_c 超前 \dot{U}_a 角度大于 120° 。

2.4 故障录波数据分析

利用某电厂机组 C 相非全相运行时, 对机组故障录波数据进行离线分析, 各侧的电压、电流的特征如图6、图7、图8所示。

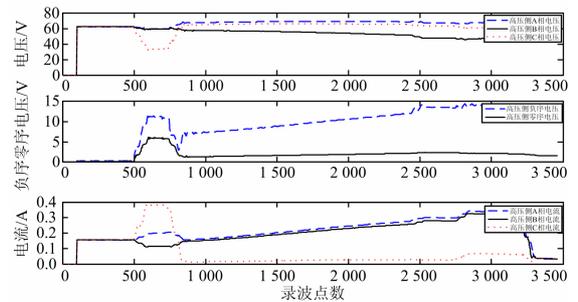


图6 高压侧电压、电流大小

Fig. 6 Size of high side voltage and current

从图6中可以看出, 非全相电流接近于0, 两健全相电流相等; 高压侧电压变化不大(B相电压偏低), 零序电压接近于0。三相电压不对称, 出现比较大的负序电压。

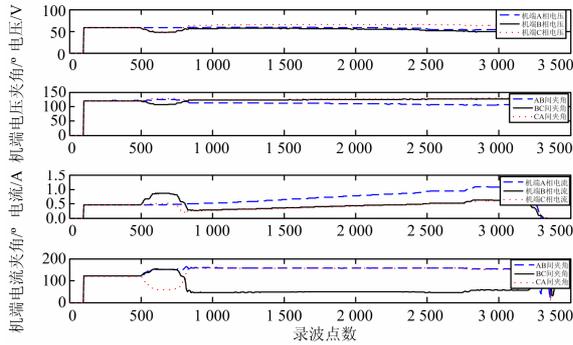


图7 机端电压、电流大小

Fig. 7 Size of generator voltage and current

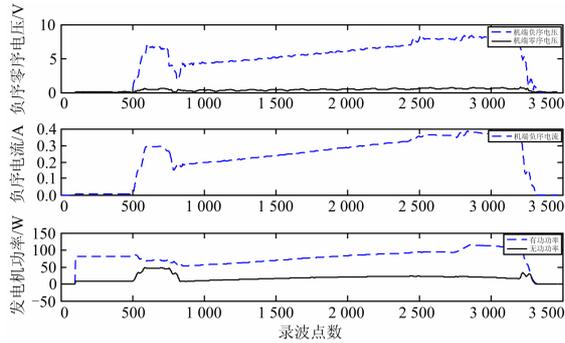


图8 机端电压及功率大小

Fig. 8 Size of generator voltage and power

从图7中可以看出,机端A相电压基本不变,B相电压小于正常时的电压,C相电压大于正常时的电压,三相电压不对称,出现比较大的负序电压;A相电流大小不变,B、C相电流大小变为负荷电流的 $\frac{\sqrt{3}}{3}$ 倍。

从图7、图8中可以看出,随着功率的增大,机端电流逐渐增大,A相电流大于0.8A,发电机额定电流为0.64A,大于1.2倍额定电流。机端存在较大的负序电压,自并励发电机复压记忆过流会启动。三相电流的不对称,出现较大的负序电流,该负序电流会对发电机转子会造成一定的损伤。

从录波数据离线分析结果看,与上述理论分析结果一致。

3 发变组非全相运行对继电保护的影响

3.1 对主变差动保护的影响

发变组主变高压侧非全相运行状态属于纵向故障,对主变差动保护而言属于穿越性故障,主变差动保护不反应机组非全相运行状态,非全相运行期间差动保护可靠不动作。根据式(4)及主变差动电流计算公式,可以计算出主变差动保护各相差动电

流为

$$\begin{cases} I_{opa} = \frac{i_a}{n} - \frac{i_A - i_B}{\sqrt{3}} = \frac{ni_A e^{j30^\circ}}{n} - \frac{\sqrt{3}i_A e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} = 0 \\ I_{opb} = \frac{i_b}{n} - \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}ni_A e^{j240^\circ}}{n} - \frac{i_B}{\sqrt{3}} = 0 \\ I_{opc} = \frac{i_c}{n} - \frac{i_C - i_A}{\sqrt{3}} = \frac{-\sqrt{3}ni_A}{n} - \frac{-i_A}{\sqrt{3}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)计算结果可以看出,主变差动各相差动电流为0,主变差动保护在高压侧非全相运行时可靠不动作。

3.2 对发电机复压(记忆)过流保护的影响

从图7中可以看出,随着功率的增加,机端电流逐渐增大,A相电流达到1.2倍额定电流以上。机端存在较大的负序电压,发电机复压(记忆)过流保护会启动,要求其动作时间必须大于开关重合闸最大时间。

3.3 对发电机负序过流保护的影响

对于线路单相接地短路后,故障相断路器跳闸引起的机组非全相运行时间比较短,线路重合闸后,发变组恢复正常运行,非全相运行期间产生的负序电流对发电机的影响比较小;对于导线一相或两相断线时,发变组非全相运行时只有发电机负序过流保护反应这种非全相运行状态,当负序电流满足负序过流保护动作条件时,保护动作将机组跳开防止发电机组受到更大的损伤。

4 结论

Y_0/Δ -11 电厂升压变压器高压侧C相非全相运行时,在高压侧有其他电源情况下,可得出以下结论:

(1) 高压侧电压变化不大(B相电压偏低),零序电压接近于0。三相电压不对称,出现比较大的负序电压;高压侧非全相相电流基本为零,正常相为负荷电流。

(2) 发电机机端A相电流不变,为负荷电流,B、C相电流为负荷电流的 $\frac{\sqrt{3}}{3}$ 倍;机端电流的相位

关系: \dot{I}_a 超前 \dot{I}_b 150° , \dot{I}_b 超前 \dot{I}_c 60° , \dot{I}_c 超前 \dot{I}_a 150° , 三相电流不对称导致出现较大的负序电流;机端A相电压不变,B相电压小于正常时的电压,C相电压大于正常时的电压,机端电压大小关

系为 $U_c > U_a > U_b$, \dot{U}_a 超前 \dot{U}_b 角度小于 120° , \dot{U}_c 超前 \dot{U}_a 角度大于 120° , 三相电压不对称导致出现负序电压值可能大于复合电压相负序电压定值。

(3) 主变差动保护不反应机组非全相运行状态, 非全相运行期间差动保护可靠不动作; 随着有功功率的增加, 电流有增大趋势, 发电机复压(记忆)过流保护可能启动, 要求其动作时间必须要大于开关重合闸最大时间。

(4) 非全相运行期间, 负序电流会给发电机转子带来危害, 发电机具有一定的承受负序电流的能力, 只要三相负序电流不超过规定的限值, 转子就不会遭到损伤。发电机负序过流保护能够正确反应机组非全相运行状态。

参考文献

[1] 陈曦. 线路非全相运行及其再故障零序方向保护的動作特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 82-88.
CHEN Xi. Action features analysis on zero-sequence directional protection of line open phase running and sound phase grounding[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 82-88.

[2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WANG Wei-jian. Principle and application of electric power equipment protection[M]. Beijing: China Electric

Power Press, 1998.

[3] 赵曼勇. 线路非全相运行时保护问题探讨[J]. 继电器, 2003, 31(7): 81-83.
ZHAO Man-yong. Discussion on some protection problem about power line operating with phase failure[J]. Relay, 2003, 31(7): 81-83.

[4] 乔永成. 大型机组启动备用变非全相保护配置方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 139-143.
QIAO Yong-cheng. Discussion on the open phase protection scheme for standby transformer in large scale generator units[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 139-143.

[5] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
LIU Wan-shun. Fault analysis of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-05-19

作者简介:

曹雪兰(1975-), 女, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护质量管理; E-mail: 124951470@qq.com
李本瑜(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;
沈燕华(1978-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。