

电力系统非全相运行时相序电流和相序电压的关系

张芜

(中国石油宁夏石化分公司, 宁夏 银川 750026)

摘要: 对电力系统非全相运行时的相序电流和相序电压采用相量图的分析方法, 简单易懂, 概念清楚, 计算方便; 易于理解和接受, 能促进运行维护及调试质量的提高; 同时提出在运行中应注意的事项, 有利于电力系统安全可靠的运行。

关键词: 断线; 非全相; 负序电压; 负序电流; 不对称

中图分类号: TM713 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)11-0015-05

1 概述

绝大多数高压输电线路和电机电器以及三相用电负荷设备, 都是按三相对称状态下运行设计的; 电力系统的不对称状态, 应理解为对称性的任何破坏, 如各相阻抗对称性的破坏、负荷对称性的破坏、电压对称性的破坏等情况下的工作状态。非全相运行是不对称的特殊情况, 即输电线或变压器等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。当负序电流流过发电机时, 将产生负序旋转磁场, 它与励磁磁场相互作用, 产生以两倍频率脉动的力矩, 因而发电机将出现 100 r/s 的振动; 同时以两倍同步转速与转子相割切, 因而在励磁绕组、阻尼绕组以及转子本体中感应出两倍频率的交流电流, 引起附加损失, 严重时烧伤转子, 影响发电机的寿命。不对称运行时, 变压器三相电流不平衡, 很可能个别相绕组已经过负荷和过热, 因此必须按发热条件来决定变压器的可用容量。

电力系统不对称运行, 将引起系统电压的不对称, 使电能质量变坏, 对用户产生不良影响; 例如当负序电压达 5% 时, 电动机出力将降低 10% ~ 15%; 负序电压达 7% 时, 则出力降低达 20% ~ 25%, 这将破坏其正常工作, 减小出力, 降低寿命。

当高压输电线一相断开或接有不对称负荷时, 较大的零序电流可能在沿输电线平行架设的通信线路中产生危险的相对地电压, 危及通信设备和人员的安全, 影响通信质量; 当输电线与铁路平行时, 也可

能影响铁道自动闭锁装置的正常工作。

电力系统不对称运行, 会对继电保护产生影响, 并使系统损耗增大; 同时系统潮流不能经济分配, 也将影响运行的经济性。

因此, 对电力系统不对称和非全相运行, 要充分认识它的不良影响, 必须全面分析, 根据电力设备不同特性, 确定不对称运行时的容许负荷, 采取适当措施, 减小和限制负序电流、零序电流的不良影响。

2 变压器两侧电压、电流对称分量的相位关系

电压、电流对称分量经变压器后, 不但数值大小要发生变化, 而且它们的相位也可能要发生变化。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。变压器的联接组别可用钟面定则表示, 以高压侧相(线)电压作分针固定在 12 点位置, 以中压或低压侧相(线)电压作为时针旋转, 每旋转 30° 为一个钟点累计, 电力系统通常采用的变压器标准联接组别有 Y/ Y₀-12 (Y₀/ Y₀-12)、/ -12 及 Y₀/ -11 (Y/ -11) 几种, 现仅讨论对称分量经变压器 Y₀/ -11 两侧电压、电流的数值大小与相位发生变化的情况, 图 1 中的 U_A、U_B、U_C、U_{AB}、U_{BC}、U_{CA}、I_A、I_B、I_C 为 Y 侧的相电压、线电压、线电流; U_a、U_b、U_c 为 侧每相对地的电压, U_{ab}、U_{bc}、U_{ca} 为 侧的线电压, I_a、I_b、I_c 为 侧的线电流, I₁、I₂、I₃ 为 侧内部各相绕组中的电流。

当在 Y₀/ -11 联接的变压器的 Y₀ 侧加上一组正序(或负序)电压对称分量时可得:

$$U_{ab1} = \frac{U_{AB1}^Y e^{j30^\circ}}{n} \quad \text{或} \quad U_{a1} = \frac{U_{A1}^Y e^{j30^\circ}}{n}$$
$$U_{ab2} = \frac{U_{AB2}^Y e^{-j30^\circ}}{n} \quad \text{或} \quad U_{a2} = \frac{U_{A2}^Y e^{-j30^\circ}}{n}$$

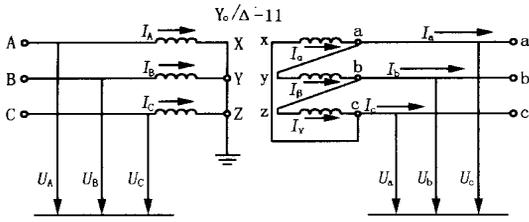


图1 Y₀/Δ-11 变压器接线图

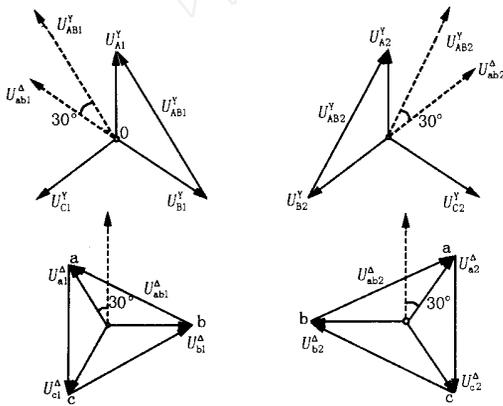
Fig.1 Connection diagram of Y₀/Δ-11 transformer

若已知 Y 侧各序分量电压,求 X 侧的各序分量电压时可得:

$$U_{AB1}^Y = n U_{ab1} e^{-j30^\circ} \quad \text{或} \quad U_{A1}^Y = n U_{a1} e^{-j30^\circ}$$

$$U_{AB2}^Y = n U_{ab2} e^{j30^\circ} \quad \text{或} \quad U_{A2}^Y = n U_{a2} e^{j30^\circ}$$

Y₀/Δ-11 变压器两侧电压对称分量间的相量关系如图 2 所示。



(a) 两侧正序电压相位关系 (b) 两侧负序电压相位关系

图2 Y₀/Δ-11 变压器两侧电压正、负序分量的相位关系

Fig.2 Phase relations between positive sequence component and negative sequence component on two sides of Y₀/Δ-11 transformer

假定变压器线电压之比为 n , 即 $n = U_{AB}^Y / U_{ab}$, 两侧绕组相电压之比为 $U_{AX}^Y / U_{ax} = n / \sqrt{3}$ 。于是侧电流与 Y 侧电流之间的关系为:

$$I_a = I_A - I_B = n (I_A - I_B) / \sqrt{3} \quad I = n I_A / \sqrt{3}$$

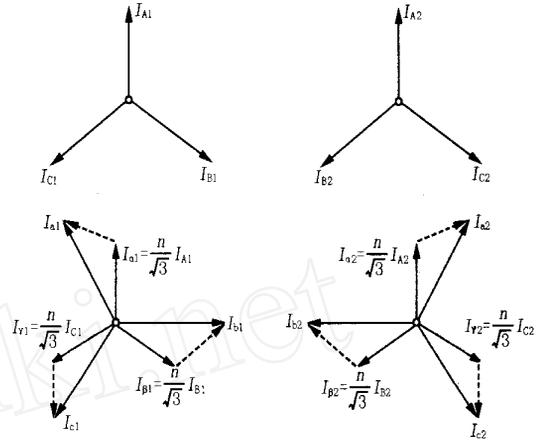
当在 Y₀/Δ-11 变压器 Y₀ 侧加入一组正序(或负序)分量电流时,两侧正序(或负序)分量电流间的关系可得:

$$I_{a1} = n I_{A1} e^{j30^\circ} \quad I_{a2} = n I_{A2} e^{-j30^\circ}$$

反过来,若已知 X 侧各序分量电流,要求 Y₀ 侧的各序分量电流时,即可得到:

$$I_{A1} = I_{a1} e^{-j30^\circ} / n \quad I_{A2} = I_{a2} e^{j30^\circ} / n$$

有关 B 相、C 相、BC 相、CA 相的各序分量关系式与上述的推导过程相类似。Y₀/Δ-11 变压器两侧电流对称分量的相位关系如图 3 所示。



(a) 两侧正序电流相位关系 (b) 两侧负序电流相位关系

图3 Y₀/Δ-11 变压器两侧电流对称分量的相位关系

Fig.3 Phase relations between symmetrical current components on two sides of Y₀/Δ-11 transformer

变压器两侧零序电流分量间的关系与变压器的联接组别、铁芯结构及系统中性点是否接地有关。对于 Y/Y-12 及 /-12 联接的变压器,两侧零序电流均无通路,故零序电流均为零。对 Y₀/Δ-11 联接的变压器,零序电流可以由 Y₀ 侧感应到 X 侧各相绕组上,在 X 侧内部形成环流,所以 X 侧引出线上的零序电流为零。

3 Y₀/Δ-11 变压器 Y₀ 侧断路器非全相断开时两侧电流的表现形式

3.1 当断路器两相未断开时

当 Y₀ 侧 A、B 两相未断开作两相运行时,如忽略电阻,则变压器星形侧的各序电流由理论分析得知: I_{c2} 和 I_{c0} 对 I_{c1} 的相位差为 180° , 画出 Y₀ 侧各序电流和全电流的相量图如图 4 所示, C 相电流为零, A、B 两相电流 I_A 、 I_B 在绝对值上相等。也就是说, A、B 两相的负荷相同。当变压器三角形与发电机连接时,电流的分布如图 5 所示,其三角形侧线路中的电流相量示于图 6 中。由此可见,在低压侧的线电流中, I_b 和 I_c 的绝对值相等,而在 a 相线路中,由于正序电流 I_{a1} 和负序电流 I_{a2} 同相,因而全电流最大,容易引起发电机该相绕组的过负荷。

变压器作两相运行时,发电机的电动势不会受到影响。但是,由于电流的不对称,也会引起网络中电压的不对称。

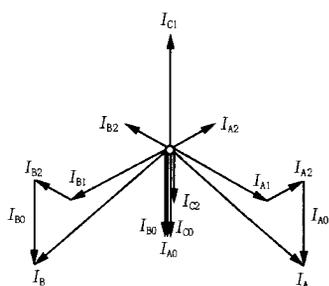


图 4 变压器 A、B 两相运行时其高压侧电流相量图

Fig. 4 Current phase diagram on high - voltage side when phase A ,B of transformer operate

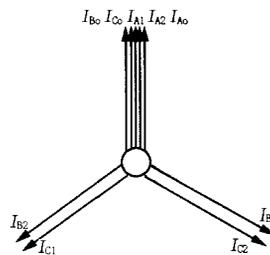


图 7 变压器 A 相运行时其高压侧电流相量图

Fig. 7 Current phase diagram on high - voltage side when phase A of transformer operates

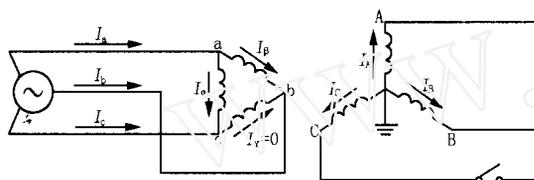


图 5 Y₀/ - 11 接线变压器 Y₀ 侧 C 相断线电流分布图

Fig. 5 Current distribution diagram on Y₀ side of Y₀/ -11 transformer with phase C broken

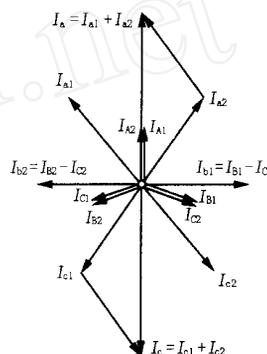


图 8 变压器 A 相运行时发电机低压侧电流相量图

Fig. 8 Current phase diagram on generator low - voltage side when phase A of transformer operates

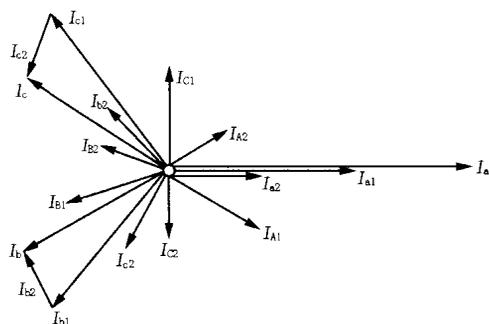


图 6 变压器 A、B 两相运行时发电侧电流相量图

Fig. 6 Current phase diagram on generation side when phase A,B of transformer operate

3.2 当断路器一相未断开时

设 A 相未断开, 则 $I_B = 0$ 、 $I_C = 0$ 、 $I_A \neq 0$, 此时变压器高低压侧电流间的关系为: $I_a = nI_A$ 、 $I_b = 0$ 、 $I_c = -nI_A$, 由此可见: 比未断开相 (A 相) 滞后一相 (B 相) 的三角形侧电流为零, 其余两相电流大小相等。这一结论对 B 或 C 相未断开同样正确, 这是判断变压器高压侧断路器一相未断开的主要标志。

变压器高压侧和低压侧的各序电流和全电流的相量图如图 7, 图 8 所示。

4 Y/ - 11 接线非全相运行时的电压分析

本文仅对 35 kV 及 110 kV 辐射形线路, 且在中性点非直接接地的电网中, Y/ - 11 接线的变压器高压 (Y) 侧一相断线时两侧电压分析; 对于有关单 (或双) 电源、中性点直接接地的电网中, 其它接线组别的变压器某一相或某两相断线时, 两侧电压的变化情况, 在此不述。Y/ - 11 接线的变压器高压侧为电源, 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; 在电源端, 电压变化不大 (故障相电压略高于健全相电压), PT 开口三角形处电压接近于 0; 负荷端接有变压器且带有负荷, 但不考虑变压器绕组的电压降, 由于变压器各绕组间电的传递效应, 使故障相电压为反向正常相电压的 1/2, 健全相及健全相间电压仍为正常值, 故障相与健全相间电压为 1/2 正常线电压。现对变压器两侧电压变化的情况分析如下:

由上述可见, 在变压器高压 (或 Y) 侧例如 B 相断线的各序电压分析情况如下:

$$U_A = U_A, U_B = -\frac{1}{2}U_A, U_C = U_A,$$

$$U_{A0} = U_{B0} = U_{C0} = U_0 = (U_A + U_B + U_C) / 3 = (1 - \sqrt{2}/2 + j\sqrt{2}/2) U_A / 3 = -\sqrt{2} U_A / 2$$

$$U_{A1} = (U_A + \sqrt{2} U_B + \sqrt{2} U_C) / 3 = (1 - \sqrt{2}/2 + j\sqrt{2}/2) U_A / 3 = U_A / 2$$

$$U_{A2} = (U_A + \sqrt{2} U_B + \sqrt{2} U_C) = (1 - \sqrt{2}/2 + j\sqrt{2}/2) U_A / 3 = (1 - \sqrt{2}/2 + j\sqrt{2}/2) U_A / 3 = -\sqrt{2} U_A / 2$$

其中:运算符号 $= e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ 。

其所对应的相量图如图 9 所示。显而易见:对 110~220 kV 变压器 Y/△-11 的一相断线时,稳态中性点偏移电压(零序电压)可达到故障额定相电压的 $U/2$ (或称为故障相的反向的 $1/2$ 额定相电压),而母线 PT 开口三角侧 $3U_0$ 稳态电压升高到 150 V,暂态电压可达到 $\sqrt{3}U$ 即 $\sqrt{3}$ p. u.。特别是在双侧电源情况下,断路器非全相重合或开断于中性点不接地变压器,据理论分析可知,在严重的情况下,稳态中性点电压将达到额定相电压 U (或称为故障相的反向额定电压值),而母线 PT 开口三角侧 $3U_0$ 稳态电压升高到 300 V,暂态过电压将接近和超过 2.0~3.0 p. u.,甚至更高。变压器中性点过电压情况更为严峻。1996 年在某电厂曾发生非全相重合与开断空载变压器造成主变中性点绝缘损坏的事故。

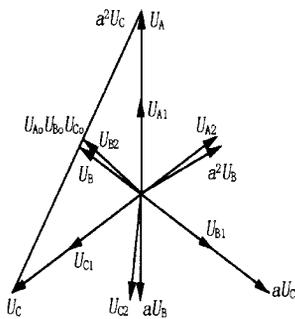


图 9 变压器高压侧 B 相断线时其高压侧的电压相量图

Fig. 9 Voltage phase diagram on high-voltage side of transformer with phase B broken

由前述分析可见, Y/△-11 变压器低压(三角形)侧的电压相量图如图 10 所示。根据理论推导可得出:

$$U_a = U_{Ae}^{-j30^\circ} / (2n) \quad U_b = U_{Ae}^{-j30^\circ} / (2n)$$

$$U_c = 2 U_{Ae}^{j150^\circ} / (2n) = U_{Ae}^{j150^\circ} / n$$

用 U 、 U_1 分别表示 Y/△-11 变压器 Y 侧不断线时低压侧的相电压、线电压,即可得低压侧的绝对

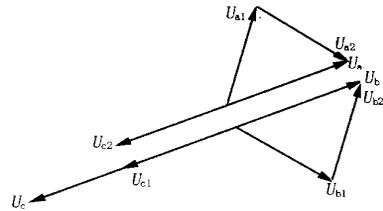


图 10 变压器高压侧 B 相断线时其低压侧的电压相量图

Fig. 10 Voltage phase diagram on low-voltage side of transformer with phase B broken

值为:

$$U_a = U / 2 = \sqrt{3} U_V / 6 \quad U_b = U / 2 = \sqrt{3} U_V / 6$$

$$U_c = U = \sqrt{3} U_V / 3$$

$$U_{ab} = 0 \quad U_{bc} = \sqrt{3} U_V / 2 \quad U_{ca} = \sqrt{3} U_V / 2$$

根据同样的方法可以得出变压器高压侧 A、C 相断线时高压侧和低压侧的电压变化情况。

5 运行中应注意的事项

(1) 电力系统在非全相运行时,通过 Y₀/△-11(或 Y/△-11)接线的变压器高低压侧的电流、电压并非直接对应,易引起运行人员的误判断和错误的处理。

(2) 负序电流会给发电机转子带来危害,但这种情况一般是在运行操作中出现的,只要运行值班人员思想集中、概念清楚、判断正确,并根据现场运行规程中的具体规定操作,这类故障是可以得到及时处理的,发电机允许负序电流出现的时间 t 与负序电流的标幺值 I_2 存在下列关系: $K = I_2^2 \cdot t$, 式中 K 为常数,对不同的机组取不同的值,同时算出对不同的非全相运行发电机流过的负序电流值,即可得知运行人员可用于处理故障的时间 t 。

(3) Y 侧一相断线,经 Y/△-11 组低压侧端子上的电压与高压侧(即 Y 侧)断线相的同名相滞后一相的对地电压等于正常时母线对地电压;而其它两相对地电压降低至不断线时低压侧母线对地电压的一半。

(4) Y 侧一相断线,通过 Y/△-11 的 Y 侧的正序电压降低至正常线电压的一半,所以用户将反映电压很低,电机启动不了,还可能反转。

(5) 110~220 kV 中性点接地系统中,在运行中中性点不接地的变压器投退操作时,必须先将中性点接地刀闸接入,以防出现非全相开断单相拒动时引起的工频过电压,这种过电压对 110~220 kV 分

级绝缘变压器中性点绝缘和中性点避雷器是危险的。

参考文献:

- [1] 王梅义,等. 高压电网继电保护运行技术(第一版)[M]. 北京:电力工业出版社,1981.

- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第一版)[M]. 北京:电力工业出版社,1981.

收稿日期: 2003-05-19; 修回日期:2003-06-19

作者简介:

张芜(1967-),女,电气工程师,现从事化工企业电气管理工作。

Relations between phase - sequence current and voltage on open phase running in electric power system

ZHANG Wu

(Ningxia Petrochemical Branch of Petro China Co., Ltd, Yinchuan 750026, China)

Abstract: This article describes phasor diagram analysis method that is used for the phase - sequence current and voltage on open phase running in electric power system. It's brief and easy to understand and calculate with clear concepts, and easy for field debugging staffs and operators to understand and accept the concepts of open phase running in electric power system operation. Thus operation maintenance and debugging quality can be enhanced. Furthermore, the problems which should be noticed in the operation are introduced in this article that can make electric power system be reliable and stable.

Key words: broken line; open phase; negative - sequence voltage; negative - sequence current; unsymmetrical

(上接第 14 页)

- [5] Green R K. Transformed automatic generation control [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1799 - 1804.
- [6] Nobile E, Bose A, Tomovic K. Feasibility of a Bilateral Market for Load Following [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 782 - 787.
- [7] Elgerd O I, Fosha C. Optimum megawatt - frequency control of multiarea electric energy systems [J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1970, PAS - 89 (4): 556 - 563.
- [8] Fosha C, Elgerd O I. The megawatt - frequency control prob-

lem: A new approach via optimal control theory [J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1970, PAS - 89 (4): 563 - 579.

收稿日期: 2003-02-27; 修回日期: 2003-05-30

作者简介:

郭小红(1978-),女,硕士研究生,从事电力系统分析与控制研究;

刘瑞叶(1963-),女,副教授,从事电力系统分析与控制研究。

Simulation and modification for load following auxiliary service model

GUO Xiao-hong, LIU Rui-ye

(Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Setting up a developed electricity market is the tendency throughout the world. The paper discusses the relations of the imbalance between the supply and the demand to the frequency deviation of the system. The load following, one of the auxiliary services, lets generator get a demand signal directly from the load monitors. On the basis, the paper proposes a load following controller, considering the market environment, just to deal with the frequency deviation by contrasting the results of the dynamic response, which are obtained by modifying the old one.

Key words: load following; auxiliary services; electricity market; frequency deviation