

易振盪電力系統保護裝置和 自動裝置的專門問題

苏联 A. B. 巴尔扎姆著

王平洋譯 許金濤校訂

電力工業出版社

前 言

苏联的許多动力系统由於应用保护装置及自动装置而显著地提高了运行的可靠性和稳定性。

繼电保护装置和自动装置的改进是由許多繼电保护工作者付出了巨量劳动而得到的。

著者曾致力於这些工作。

由於頑强地克服了技术上和組織上極其巨大的困难，所以获得了良好的結果。

本書內敘述了關於易振盪系統內保护装置和自动装置專門措施的若干总结。

A. M. 費多謝也夫講師閱讀了手稿並提出了意見，作者很愉快地向他表示感謝。

A. B. 巴尔扎姆

目 录

緒 言	3
1. 系統中沒有短路而振盪时的电气量	5
2. 振盪时併列运行發机电动势向量間的角度	8
3. 既有短路又有振盪时系統内的电气量	13
4. 振盪时繼电保护裝置的动作情况	16
5. 对振盪不大敏感的保护裝置	26
6. 对振盪不敏感的保护裝置	28
7. 振盪时解列系統的裝置	36
8. 提高易振盪系統稳定性的主要措施	42
9. 实践的結果	64
10. 結論	70
参考文献	71
附录 1 防止在振盪时保护裝置誤动作的裝置的灵敏性, 这裝置是反应於出現反相序的电气量的	77
附录 2 反相序濾过器的主要参数	88
附录 3 用典型曲綫来求算电动势向量間角度以供短路电流計算之用	92

緒 言

苏联在战前年代里电气化的广泛發展，以及併列运行着的系統由於严重的故障而發生了振盪和解体，都对电厂工作者和系統工作者提出了覓取有效的方法来和振盪作斗争的問題。

易振盪的系統就是指所有二个或以上的發电厂，通过穿梭性聯絡綫的电抗而併列运行着的系統。

易振盪系統的保护問題曾在我国(指苏联——譯者)和外国的技术期刊內給予極大的注意。

这些問題曾經不止一次地在电工會議上成为討論的題目[Л. 1~72]。

苏联战前时期的作品已經为解决有关易振盪系統保护的一些主要問題准备了条件。

这些作品有 C. A. 列別傑夫、И. C. 日丹諾夫的作品[Л. 1]，著者的作品[Л. 9, 10, 12]，B. M. 郭尔施謙因工程师的作品[Л. 23]，И. A. 守罗米雅尼柯夫工程师對於提高亞洲动力系統稳定性所实行措施的总結的作品[Л. 24]，C. A. 列別傑夫教授關於电子管型电压調整器的作品[Л. 32]等等。

在战前年代里，已經得到了运行的經驗，这些經驗指出了有一些建議是有效的。

在亞洲动力系統內曾對於提高整个系統稳定性获得了重大的成功[Л. 24]。

著者所發明的速动保护装置(高頻的, 等等)和防止振盪

时誤动作的閉鎖裝置，其运行經驗是良好的[Л. 20, 21]。

可是，在許多系統內，尤其当發電厂的併列运行是通过了長距离的穿梭性聯絡綫时，穩定性問題，还没有得到解决。在这种系統內持續的振盪，曾經認為是普通的現象。

这証明了有必要修改在这个問題上現行的办法。

在偉大衛國战争和战后年代里，普遍地整頓了运行方式並增加了新的發電容量，这就要求在繼电保护和自动技術部門內採取整套措施来大力地和迅速地改善运行情况，以消除扰乱动力系統运行的持久性振盪和紊乱时的跳閘。

在許多动力系統內曾經根据改建保护裝置和自动裝置的计划来規定进行專門工作和整頓現有的保护設備。

由於执行了預定的工作，結果完全消灭了这些系統的振盪和解体[Л. 30, 31, 47, 69 及 71]。

根据运行的經驗現在可以对易振盪系統內繼电保护和自动裝置的全部問題提出具体的建議。

在这些問題中，有些問題在苏联已於最近几年內首次得到了解决，有些問題还需要补充理論分析和进一步实践研究（譬如關於复激和远方机械等），可是任何一种措施的意义都是很明显的，並且要从經驗中証明這項建議的合理性。

下文試把直到現在为止已經掌握的關於易振盪系統的保护裝置和自动裝置的材料加以系統化，肯定一些在这方面已有的工作經驗，並且从問題的理論方面和实践方面加以說明。

1. 系統中沒有短路而振盪時的電氣量

振盪時的電流, 電壓和電流與電壓間的角度 為了簡化起見, 並說明一些主要的關係, 就是對分析保護作用來說是重要的關係, 須研究一個最簡單的系統 (圖 1), 這是由二個發電廠 M 及 N 所組成的, 通過輸電綫 GF 併列運行着。假定發電機電動勢的數值相等, $E_1 = E_2 = E$, 又假定電動勢作用點之間的全部電阻抗是均勻地分佈着的。

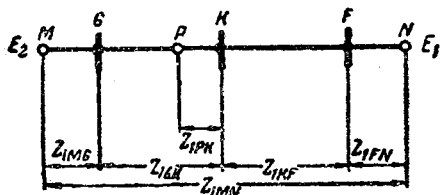


圖 1 最簡單的系統

如果發電機 N 的電動勢向量的數值和方向都作為不變的常數, 那麼發電機 M 的電動勢向量和電動勢間角度 δ 的關係如下 (圖 2):

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 e^{j\delta}. \quad (1)$$

這二個電動勢的差等於

$$|\Delta \dot{E}| = |\dot{E}_2 - \dot{E}_1| = |\dot{E}_1 (e^{j\delta} - 1)| = \Delta E_m \cdot \sin \frac{\delta}{2} = 2E \sin \frac{\delta}{2}. \quad (2)$$

由於這個電動勢差 $\Delta \dot{E}$, 發電機間流動着對稱性的電流

$$|\dot{I}_{GF}| = \left| \frac{\Delta \dot{E}}{Z_{1MN}} \right| = I_{GFm} \sin \frac{\delta}{2} = \frac{2E}{Z_{1MN}} \sin \frac{\delta}{2}. \quad (3)$$

在任何一點 P (P 點的地位是在 M 和 N 間變動的, 圖 1) 的電壓如下:

中这样的一点，在这里綫电流和这一相的相电压間的角度等於零，就是說是零电抗点的位置。

这一点的几何位置，即使在圖 1 的最簡單的系統內，也是随着 δ 角而变动的。

电气中心点和零电抗点間的电压降等於

$$|\dot{U}_{KL}| = |\dot{I}_{GF} Z_{1KL}| = U_K \operatorname{ctg} \varphi_c. \quad (6)$$

电气中心点和零电抗点間的阻抗由式 (6), (5) 和 (3) 求得:

$$\frac{2E}{Z_{1MN}} \sin \frac{\delta}{2} Z_{1KL} = E \cos \frac{\delta}{2} \operatorname{ctg} \varphi_c, \quad (7)$$

由此

$$Z_{1KL} = \frac{Z_{1MN}}{2} \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} \operatorname{ctg} \varphi_c. \quad (8)$$

在圖 1 最簡單的系統內的任何一点上，电流和电压間角度可以求算如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_P &= \arccos \frac{I_{GF}}{U_P} (Z_{1PK} \cos \varphi_c + Z_{1KL} \sin \varphi_c \operatorname{tg} \varphi_c) \\ \text{或} \quad \alpha_P &= \arccos \frac{I_{GF}}{U_P} (Z_{1PK} \cos \varphi_c + \frac{Z_{1MN}}{2} \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} \sin \varphi_c) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

从上面所引用的关系可以知道，当併列运行着的电厂的电动势向量分离时，电流，电压和电流电压間的角度数值都变化着，而在复杂的網絡內各个不同点上电流和电压間的角度可能是最难确定的。

电动势向量間的角度愈大則对正常值的偏移也愈大。

在振盪时这些电气量的变化，是和短路时的变化不同的:

1. 在振盪时，电气量依併列运行电机电动势向量間的角度而随时間平滑地变化。

当电动势向量間的角度近於零时，和在变化过程的初始

时, 电气量比起初始值来是沒有多大变化的; 一定時間后, 电动势間角度的增大引起了电气量比起正常值来較為急剧的变化。

在短路时, 电气量是突然变化的。

2. 振盪时系統各点上电流和电压間的角度可能有十分不同的数值, 而难于預先估計。

3. 在振盪时, 如果沒有短路, 而且穿梭性聯絡綫上也沒有不对称情况, 那么所有的电气量是对称的。

在短路时 常常見到电气量的不对称。在不对称的故障中, 系統不正常状态的全部時間內, 电气量是不对称的。在三相短路时, 正如經驗和分析所指出的 (見下文) 常常在故障开始的時間內产生不对称性, 这是由於三相不同时接触, 和短路电流的非周期性分量所致。

2. 振盪时併列运行發电机电动势向量間的角度

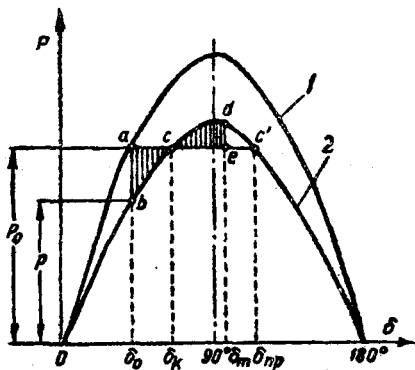


圖3 發电厂工作於無窮大容量的母綫时的电力特性

如果併列运行的兩個發电厂中的一个 (圖1), 譬如 N , 有無窮大的容量, 那么由發电厂 M 输出的有功电力, 依电动势向量間角度而变化, 如圖3的曲綫1。

正常运行方式以功率 P_0 和角度 δ_0 来代表。

由於系統常数的变化而使运行方式改变时

由發电厂 M 輸出的功率也有变化(曲綫 ϱ)。

如果功率的需要量保持不变, 等於 P_0 , 那么符合於新的运行方式的角度 δ_k 就以 c 点的横軸座标求得。

由於發电机轉子的慣性和原动机調速裝置的慣性, 电动势向量間的角度从 δ_0 过渡到 δ_k 並不是一下子进行的, 而是循着周期性的(圖 4, a) 或在具有很大阻尼的系統內循着非周期性的(圖 4, b) 振盪而进行的。

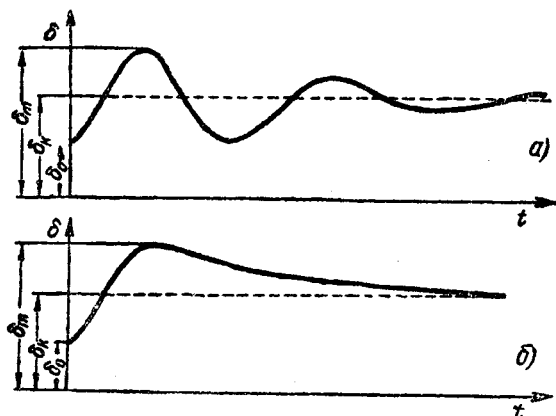


圖 4 在衰減性振盪時, 电动势向量間的角度依時間的变化关系

电动势向量間角度的最大值 δ_m 以 d 点的横軸座标 求得(圖 3)。直綫 de 划出面积 cde 等於 abc , 这面积 abc 代表發电机轉子在發生故障時由於軸上过剩出力所引起的加速量。

电动势向量間的角度一直增大着, 直到制动面积 cde 等於加速面积 abc 時为止。

如果加速功率, 即面积 abc , 不超过可能得到的制动面积 cde , 那么系統就保持着同期; 如果角度 δ_m 大於角度 δ_{np} 就开始失去同期。

如果兩個發电厂的功率都是有限的, 那么电流, 电压和它

們之間角度值和這些發電廠電動勢向量間的角度差有關（這些電動勢向量角度是依着同一個座標系統計算的）：

$$\delta = \delta_M - \delta_N. \quad (10)$$

把發電廠 N 的電動勢向量固定在計算角度的起點上，就是說假定 $\delta_N = 0$ ，那麼我們不難看到，如果發電廠 N 的電力是無窮大的話，發電機間的可能的極限角度就是極限角 δ_{np} 。

角 δ_{np} 的數值可以求算如下（圖3）：

$$\delta_{np} \approx 180 - \delta_\kappa, \quad (11)$$

這裡 δ_κ 是電動勢向量間的角度，符合於系統的新的運行方式的穩定狀態。

為了粗略的初步計算，可以假定

$$\delta_{np} \approx 120^\circ.$$

對於具體的系統來說， δ_{np} 和 δ_κ 角的數值可以用普通的穩定性計算法來求得。

如果系統不能保持同期，那麼電動勢向量間的角度超過 180° 而將增加到 360° 。

要分析保護裝置的動作和選擇保護裝置的類型，就要明了電動勢向量間角度對時間的變化，這是有極其重要意義的。

電氣量最急劇的變化產生於電動勢間角度變化較快而且變化較大的時候。這樣看來，實際上有周期雖然不大而穩定性仍被破壞的情況。

對於可以化為“發電廠—無限大電力的母綫”或“兩個有限電力的發電廠”的系統，可以應用一些典型曲綫來最簡便地求出角度按時間的變化和極限角度的數值[附錄3及Л. 42~45]。

為了繼電保護的目的，可以用此法來對局部的情況初步

求出电动势向量間的角度，就是当其中一个發电厂全部減除了它的負荷，而其它一个發电厂則沒有改变它的初始情况时 [Л. 2]。在这一个情况下發电厂減除了負荷的电机轉子，对其它一个發电厂（就是对無穷大电力的系統）來說，得到了等加速运动。

其相对角度等於：

$$(\delta - \delta_0) = \delta_{12} = \frac{A t_k^2}{2}, \quad (12)$$

这里

$$A = \frac{\omega}{2K} P_i \quad (13)$$

式中 ω —— 角速度；

P_i —— 电机上的机械負荷；

K —— 轉子的旋轉能量：

$$K = k P_n,$$

式中 P_n —— 电机的額定容量；

k —— 旋轉能量的單位数值，按額定容量 1 兆伏安計。

汽輪發電机的 $k = 9 \sim 11$ 。

水輪發電机的 $k = 3 \sim 5$ 。

同期調相机的 $k = 1 \sim 3$ 。

計算(12)及(13)式时，相对角度的弧度数將等於：

$$\delta_{12} = \frac{\omega}{4} \times \frac{1}{k} \times \frac{P_i}{P_n} t_k^2$$

或按度数：

$$\delta_{12}^\circ = 2\pi f \frac{360}{2\pi} \times \frac{1}{4k} \times \frac{P_i}{P_n} t_k^2.$$

在 50 周波时

$$\delta_{12}^\circ = 4500 \frac{1}{k} \times \frac{P_i}{P_n} t_k^2. \quad (14)$$

从表达式(14)可以作出下列結論：

1. 当其它条件相同的时候,为了保证运行的稳定性,对旋轉能量 K 較小的發电机要求最快的切除故障。

2. 当發电机負荷很重时要求最快地切除故障。

3. 如果故障發生在穿梭性的聯絡綫上(圖1)当故障切除得足够快的时候,可能在發电厂 M 及 N 失去同期以前使穿梭性聯絡綫进行自动重合閘。

譬如,当 $k=10$, $\frac{P_i}{P_n}=0.8$ 及 $\delta_{12}^\circ=50^\circ$ 时,从發生故障的时间算起这時間等於 0.35 秒。

4. 当靠近發电机母綫有三相短路时,或在重負荷的穿梭性聯絡綫上在靠近幹綫处有三相短路时,为了保持發电厂的运行稳定性,其切除故障時間,如併列运行的是汽輪發电机則大致不得超过 0.35 秒,如屬水力發电机則为 0.20 秒。在这兩種情况下,轉子位移的極限角度都假定等於:

$$\delta_{12np} = \delta_{np} - \delta_0 = 50^\circ.$$

5. 表达式(14)是为严重故障的个别情况即三相短路而制定的,这个事故同时使工作於無穷大电力的系統上的我們所研究的机組全部減除了負荷[Л. 2]。

對於並沒有全部減除負荷的情况,那末其中一些發电机轉子的超速較其他一些轉子为緩慢,並且为了保持稳定性而切除負荷的时间可以長一些。

这一过程的特征,譬如电动势向量間角度分离的数值,和为了保持稳定性而切除短路的时间,在一般的情况下,都可以最簡便地用典型曲綫来求得(見附录 3, 圖 1~10)。

在二相短路时,尤其是單相短路时,要保持稳定性的切除故障時間,照例可以大於上述的数值。

3. 既有短路又有振盪時系統內的電氣量

在有併列運行的發電廠的系統內，短路會改變發電機間互相聯系的參數，因而引起振盪。

如果發電廠電動勢間的角度變動很大，那麼由於產生了均衡電流，而使流到短路點的電流改變其數值和相位 [Л. 3]。

在這裡，只有在計算短路電流的初始值時才可以假定向量是同相位的。

電流向量對這組發電機的電動勢向量來說，滯後一個角度 φ_c ，這角度 φ_c 決定於算到短路點的系統參數。

專門的研究和大量的驗算已經指出 [Л. 42]，由於電動勢向量分離而來的均衡電流對發電機電動勢數值和相位的變化，實際上影響不大。因此，當計入電動勢向量的分離時，短路點的電流可以求算如下 [Л. 41, 42] (圖 5)。

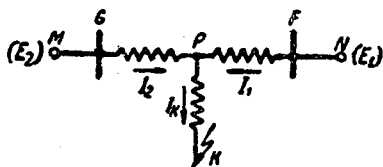


圖 5 穿梭性聯絡綫支路上的短路

a) 計算故障相電流的初始值；

b) 計算從發電廠 M 及 N 流到短路點故障相的電流在瞬間 t_k 時的值（應用衰減曲綫，或把瞬間電抗後的電動勢假定是常數）；

b) 用典型曲綫（附錄 3，圖 1~10）或其它方法計算在瞬間 t_k 時的電動勢間角度 δ_{ik} ；

г) 計算在故障相上從發電廠 M 及 N 發出的，相差角度為 δ_{ik} 的電流的幾何總和。

当沒有切除短路而稳定性也破坏了时，那么故障点的电流会脈动很大，而这时候从发电厂 M 及 N 發出的这一相的电流則脈动較小。

在不对称的短路时，穿梭性联络綫上沒有故障的相内有較大的电流脈动。

在切除故障后发电厂 M 及 N 間穿梭性联络綫上电流的脈动出現於所有各相内。

为了明确故障点电流流动的特性，下面將研究靠近系統电气中心点的三相短路，这时一个发电厂全部減除了負荷，其余一个发电厂繼續正常的运行。

这种故障在分析保护裝置的工作时是很值得注意的，因为这时候在故障点电流的变动最大，因此，电流起动元件的工作条件是最不利的。

故障点电流对其初始值的倍数为：

$$k_i = \sqrt{1 - 4\gamma_{10}\gamma_{20}\sin^2\frac{\delta_{12}}{2}}, \quad (15)$$

这里 γ_{10} 和 γ_{20} —— 在初始的瞬間从各发电厂流到短路点的各部分电流。这时候发电厂电动势向量間的位移可以假定約等於零：

$$\text{及} \quad \left. \begin{aligned} \gamma_{10} &= \frac{I_{10}}{I_{\infty 0}} \\ \gamma_{20} &= \frac{I_{20}}{I_{\infty 0}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

当三相短路靠近电气中心点时

$$\gamma_{10} = \gamma_{20} = 0.5.$$

在这种情况下电流的倍数等於：

$$k_i = \cos\frac{\delta_{12}}{2}. \quad (17)$$

對於我們研究的个别情况來說，且当 $\frac{P_i}{P_n} = 0.8$ 时，在故

障点电流的倍数, 如果計入第(14)式將是:

当汽輪發电机稳定性破坏时($k=10$)

$$k_i = \cos 180 t_k^2; \quad (18a)$$

当水輪發电机稳定性破坏时($k=5$)

$$k_i = \cos 360 t_k^2; \quad (18b)$$

当同期調相机稳定性破坏时($k=3$)

$$k_i = \cos 600 t_k^2. \quad (18c)$$

按第(18)式的近似公式来計算所得到的数值, 有一次和交流电網計算台上用分段計算法的精確計算相近合, 另一次和实验数据相近合(圖6及7, Л. 41)。

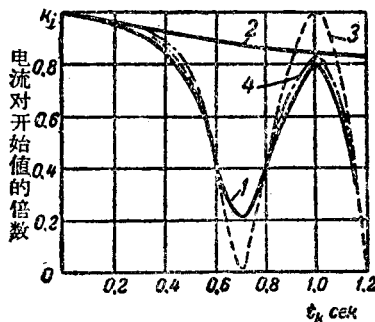


圖6 在三相短路时故障点电流按时间的变化

1—在交流計算台上用分段計算法的計算;
2—用衰減曲綫的計算; 3—用公式 $k_i = \cos 180 t_k^2$ 來計算; 4—同3, 但計入發电机电动势的衰減, 应用衰減曲綫。

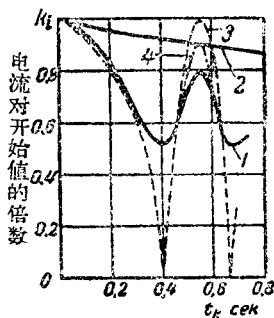


圖7 有同期調相机的網絡內在三相短路时故障点电流随时间的变化

1—录波器記錄的故障点电流; 2—用衰減曲綫的計算; 3—用公式 $k_i = \cos 600 t_k^2$ 來計算; 4—同3, 但計入同期調相机电动势的衰減。

上述的分析明确了, 当短路而同时併列运行發電厂的电动势向量分离时:

1) 在短路点的电流可能是脈動的;

2) 电动势向量間的角度愈大或 短路点愈近 电气中心点 时 电流的脈动愈大;

3) 发电厂 M 及 N 間穿梭性綫路的故障相上, 在不切除 短路时出現較小程度的电流脈动, 在 切除 短路以后出現較大的脈动;

4) 当未切除不对称的短路而同时發生稳定性的破坏时, 电流的脈动急剧地出現於穿梭性綫路無故障的相內和到短路 点去的支綫的故障相內;

5) 在复杂的系統內不計及电动势 向量 分离的短路 計算 会得出不正确的結果;

6) 在故障点的短路电流可以求得为从发电厂 M 及 N 流 到故障点的电流的几何总和, 这將有足够的准确程度。对这一瞬間來計算, 可假定电流和电动势的向量相符合, 而其电流 的位移角度就等於电动势向量的角度;

7) 最簡便地計算电动势向量間的角度可以用典型曲綫;

8) 为了在分析繼电器保护动作上得到初步概念起見, 可以应用在上述条件下用(18)式按三相短路的个别情况而計算 所得的电流近似值。

4. 振盪时繼电保护裝置的动作情况

过电流保护 定时限过电流保护裝置在振盪时, 如果在 繼电器綫圈內过电流持續的时间大於保护裝置的动作时间就要动作。

在繼电器电路內 当 电流变为大於起动电流的时候, 保护 裝置就起动 (圖 8), 而当繼电器 电流变为小於回复电流的时候, 保护裝置就停止 (圖 8 的 a 点和 b 点)。