

电力系统自动学

〔苏联〕 A. B. 巴尔扎姆 著 牟敦庚 译

中国工业出版社

电力系统自动学

〔苏联〕A. B. 巴尔扎姆 著

牟敦庚 译

中国工业出版社

本书阐述电力系统中用以预防及消除故障的各种自动装置的结构、用途、动作原理等。

上篇叙述同步发电机的自动调节励磁、按频率自动减负荷、频率和有功功率的自动调节等；下篇介绍三相和单相自动重合闸、备用电源自动投入等。

本书可供从事电力系统继电保护和自动化工作的技术人员参考，也可作为有关专业的教学参考书。

А. Б. Барзам
СИСТЕМНАЯ АВТОМАТИКА
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ Москва 1959

电 力 系 统 自 动 学

牟 敦 庚 译

水利电力部办公厅图书编辑部编辑（北京阜外月坛南营房）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

北京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $14\frac{1}{8}$ ·字数294,000
1965年5月北京第一版·1965年5月北京第一次印刷
印数0001—5,140·定价(科五)1.60元

统一书号：15165·3831（水电-501）

序 言

动力系统的建立标志着电气化的现代化发展，在动力系统中，被传输线路联接起来作并列运行的若干个发电厂保证了对用户的动力供应。

在創制并运用一系列自动装置（所謂系統自动装置）之后，动力系统的可靠及经济运行已经成为可能；这些自动装置的主要用途是：防止并消除系统事故，在动力系统的正常結线遭受破坏以后恢复对用户的供电。

系统事故破坏了整个动力系统的运行，事故中将出現大量地切除用户，系统大量地自行减載；发电厂和部分系统之間并列运行的稳定被破坏；动力系统被意外地解列为几个部分或发电厂由系统分列出来等情况。此外，系统事故还表现为系统频率低于允許的数值^①。

本书上篇将介紹以預防及消除系统事故为主要用途的自动装置。下篇論述自动重合閘和备用电源及备用设备的自动投入。利用这些装置，可以在发生事故以后恢复正常的供电結线以及对用户的供电。

大量地采用自动装置从根本上改变了动力系统的运行特点：减少了事故时的出力缺額，提高了电能的质量（更稳定地維持着频率和电压），增加了穿越联络线路的过载能力，在并列运行的发电厂和机組之間更合理地分配負荷，降低了线路和变电所的造价，最后，还为縮减运行人員創造了条件。

例如，在許多电厂內所有的发电机上所設置的速动励磁調节装置大大地提高了并列运行的稳定，同时还减轻了在調节电压及无功功率方面的困难；自动調速器保证了频率的維持及有功負荷在发电机之間的分配，并促成了各台机組并列运行的可能性。

自动重合閘以及备用线路和备用变压器的自动投入，恢复了供电結线和对用户的供电，同时为許多变电所过渡到无人值班和集中控制創造了条件。

АПВ和ABP装置往往可以防止系统事故的发生。例如，发电厂厂用备用变压器的自动投入可以防止巨型发电厂的停电和频率降低；如果系统間的平行穿越联络线路中的一条线自动重合閘成功，則可以防止其它线路过負荷、跳閘以至系统解列。

系统自动装置的工作和继电保护装置的工作是有机地联系着的。因此，书中論述了在继电保护和自动装置协同工作时所出現的一些特点，这些特点在保护装置起动元件的动作原理方面以及选择性切除短路的方法方面都引起了某种改变。

根据电气设备安装規程，书中所研究的自动装置用于下列目的：

a) 提高发电机并列运行的稳定度；

^① 在苏联电站部根据对发电厂和电力网运行中的事故与缺陷进行調查統計而发出的指示中，认为所列举的运行破坏都属于系统事故（如果在发生事故时自行减載的数量超过动力系统全部負荷的20%）；同时，若频率下降到低于49.5赫并持续达一小时以上时，或低于49赫并持续30分钟以上时，即使不致破坏稳定或切除用户，也都认为是系统事故（1957年指示草案）。

IV

б) 調节电压, 在同步电机之間以及在发电厂之間分配无功負荷, 并在切除短路后使电压恢复;

в) 防止長時間和不容許的頻率降低;

г) 調节頻率和有功功率, 在发电厂之間以及在同一发电厂的各台机組之間分配有功功率, 并防止系統聯絡线路不容許的过負荷;

д) 在正常及事故运行方式下, 将发电厂的机組以及部分动力系統投入并列运行;

е) 在线路(一条或一相)、母线和变压器等自动跳閘以后, 将其自动重合;

ж) 在結线图中进行切换以恢复供电并投入备用設備。

在本书相应各章中研究了各种裝置的不同結线图以及凭借該裝置完成規定操作的方法。

对于自动裝置中各种元件(继电器、調节器、放大器等)的构造特点, 书中只是在为闡明整个裝置的动作原理所要求的限度內予以透彻的探討。

书中分別用原理結线图、展开結线图或結構图(亦称方块图)来表明自动裝置的結线或系統。

在原理結线图中, 继电器或其他自动元件的感受及执行部分系画在一处^①。这就可以帮助人們更充分地理解結线图中各个继电器和元件工作的物理实质以及在它們的动作之間的相互联系。对于比較简单的結线, 如果遵照一定的繪图法則, 原理結线图的直觀性是可以完整地保存下来的。唯在繪制复杂裝置的原理結线图时, 将出现大量的交叉, 从而破坏了它的直觀性并可能发生錯誤。

在繪制展开图时, 要求将自动裝置的感受和执行部分分离开, 这就在理解裝置工作的物理实质方面造成困难。然而, 这种結线图是用直线来連接裝置的各个元件的, 因而其线路的交叉为最少, 这就更容易检查电气回路是否連接得正确。

結構图(有时又称方块图)表明构成自动裝置的結構以及裝置內所包含的各个环环节(元件)之間的相互联系。这种图不闡明各个元件的工作实质。图中把每个元件都繪成矩形方块并用字母表明其意义(例如, БУ——控制元件, ИБ——执行元件等)。

根据全苏国家标准7624—55所載电气結线的图例, 书中继电器接点的位置是假定的, 并相当于感受系統处于失电状态(即使在結线图中感受系統实际上是流着电流的)。用代表电器的用途或其感受系統所反映的量的大写字母来作为結线图中各元件的符号〔例如: PT 或 T——电流继电器, ПП 或 П——中間继电器, PB 或 B——時間继电器, РПВ 或 ПВ——帶时限的中間继电器, КУ——控制鍵, БК——輔助接点等等〕。

如果继电器或裝置具有若干个接点, 則在字母之后标以順序号(例如, 帶三对接点的中間继电器的接点分別标以 П-1, П-2, П-3)。如有用途相同的若干个电器, 則可在字母前面加注数字来识别(例如, 帶两个接点的某一中間继电器 1 П 和帶三个接点的另一中間继电器 2 П 的接点乃分別标以 1 П-1、1 П-2 及 2 П-1、2 П-2、2 П-3)。

系統中所裝設的自动裝置必須保证其工作的可靠性, 特别是在出現非正常运行方式的

① 这种結线图因此又名为結合結线图。

条件下。因此，应采用最简单的結线图，其結構可靠并带有最少量的接点和可动部分。自动装置的动作原理必須清楚、明确、可靠并尽可能简单。

采用任何一种自动装置都应有明确的目的，并考虑到利用該装置时所得的技术经济效益。

本书論述了已为肯定了的运行经验所檢驗过的自动装置。尚处于研究阶段的自动装置（例如，“强作用式”励磁調节器、用短時間接入电阻的方法使发电机自动制动的装置、遙控减負載的装置等等）书中未予詳細介紹，而只在某些地方引述了某些研究工作的发展远景；同样也沒有討論电动机机械式电压調节器的作用，因为它已被沒有可动部分的調节器所替代。

在动力系統中，自动装置是与远动装置的設置配合使用的，这些远动装置使人們得以集中控制距离指揮所（即調度所——譯者）很远地带的目标。书中未討論动力系統の远动化（遙控、遙測和遙信）問題，因为它们属于独立的專門范畴。然而必須指出，如果有可能自动地或凭借远动装置实现某些操作，則即使在经济技术指标相同的条件下也宜采用使操作过程自动化的解决方案。此时将消除值班人員可能的誤操作，减轻他們的工作并提高对用户供电的可靠性。

系統自动装置的研究和运用要求动力系統，調整部門，設計和科研机构的继电保护和自动装置部門的全体工作人員作出大量的努力。大型火电站及水电站的兴建，原子能电站的投入运行，統一的动力系統の創立，無疑在系統自动化方面提出了新的課題，同时在管理动力系統方面規定了新的可能性。

当动力方面的中技学生学会了課程《继电保护和自动装置》及《动力系統自动化》的个别章节之后，以及当进行課程設計及毕业設計的專題設計时，可以利用本书作为教学参考书。

作者向莫斯科动力学校的教师們表示感謝：工程师B. B. 伊利尼奇宁，M. П. 庫奇金，T. M. 波亚尔科夫，以及本书的評閱者E. П. 澤伊利德戎和E. П. 西罗京斯基，他們在审閱手稿时曾提出了宝贵的意見。

作者必須指出，工程师A. П. 斯莫尔奇科夫在編輯本书时曾付出了巨大的劳动。

作 者

目 录

序 言

上篇 預防及消除系統事故的自动裝置

第一章 同步电机的自动調节励磁 (APB)	1
1-1. 决定自动調节励磁与快速切除短路在保持同步电机并列运行的稳定度方面的 动作效果之基本关系式	1
1-2. 同步电机的 APB 裝置的用途和实现特点	5
1-3. 与电磁式电压校正器配合使用的同步发电机复式励磁裝置	7
1-4. 同步电机的强行励磁	11
1-5. 水輪机自动調节励磁裝置的特点	13
1-6. 相位复式励磁裝置	15
1-7. 利用 APB 裝置調节动力系统的电压和无功功率	18
1-8. 同步电机励磁及自动灭磁裝置的实现方法	26
1-9. 結 論	31
1-10. 习題	31
第二章 快速切除短路及防止在过負荷、振蕩及异步运行时誤跳閘的措施	32
2-1. 概 述	32
2-2. 振蕩及异步运行时的电气量	33
2-3. 振蕩及异步运行中继电保护的行为与防止其誤跳閘的措施	37
2-4. 降低保护裝置对于过負荷、振蕩及异步运行电流的灵敏度的特殊起动元件	42
2-5. 結 論	45
2-6. 习題及例題	45
第三章 动力系统按頻率自动减負荷 (AЧР)	46
3-1. AЧР 裝置的用途及其实现特点	46
3-2. 引起动力系统中頻率短时下降的原因及装設 AЧР 裝置时对这些因素的考虑	52
3-3. 局部的按頻率减負荷	57
3-4. AЧР 裝置各輪动作时限的整定	57
3-5. AЧР 裝置結线图	59
3-6. ИВЧ-011 型頻率继电器	61
3-7. 結 論	64
3-8. 习題	64
第四章 頻率和有功功率的自动調节	65
4-1. 概 述	65
4-2. 調节頻率和有功功率的基本方法	66

4-3. 一次調速器	71
4-4. 頻率和有功功率的二次調速器的实现原則	76
4-5. 当动力系統中頻率降低时备用水輪发电机的自动投入 (頻率起動)	83
4-6. 参加动力系統頻率調节的水电站的自动操作器	86
4-7. 結論	89
4-8. 习题	90
第五章 事故条件下同步发电机和部分动力系統的快速并列	91
5-1. 概述	91
5-2. 用自同期法并列	91
5-3. 自动投入发电机的自同期裝置	95
5-4. ИРЧ-01 型 頻差監視继电器	99
5-5. 監視轉速的其他方法	100
5-6. 发电机和部分动力系統之間的非同期并列	101
5-7. 事故条件下用准同期法自动投入发电机的裝置 (自动准同期裝置 АСТ-4)	103
5-8. 結論	110
5-9. 习题	111
第六章 防止并消除系統事故的其他自动裝置	112
6-1. 发电机在甩負荷时的快速制動	112
6-2. 穿越线路的自动減載	114
6-3. 异步运行时將系統自动解列为独立运行的部分 (解列保护裝置)	114
6-4. 將系統自动解列为装有汽輪发电机和水輪发电机的两部分	119
6-5. 結論	121
6-6. 习题	122

下篇 自动重合閘 (АПВ) 和备用电源及备用設備的自动投入 (ABP)

第七章 輸电线路的三相自动重合閘 (ТАПВ)	123
7-1. 使用 АПВ 裝置的一般問題	123
7-2. 单側供电的单回线路的三相 АПВ 裝置	128
7-3. 兩側供电的单回线路 (沒有其他的平行聯絡线) 的三相 АПВ	135
7-4. 有平行聯絡线时, 兩側供电线路的三相 АПВ (环状电网线路的 АПВ 和平行线路的 АПВ)	154
7-5. 結論	155
7-6. 习题及例題	156
第八章 輸电线路的单相 АПВ (ОАПВ)	158
8-1. 概述	158
8-2. 单相接地及一相断线时的电流和电压	159
8-3. ОАПВ 裝置选相元件的型式	162
8-4. 全苏电工科学研究所的 ОАПВ 裝置結线图	166
8-5. 在单側供电的輸电线路上用两次动作的三相 АПВ 裝置和单相隔离开关 来替代 ОАПВ 裝置	168

VII

8-6. 結論	168
8-7. 习題	168
第九章 电力变压器、母线和其他元件的АПВ	169
9-1. 概述	169
9-2. 变电所的母线АПВ	170
9-3. 电力变压器的АПВ	171
9-4. 电动机的自动再启动	175
9-5. 自动替换高压熔断器的АПВ	176
9-6. 結論	176
9-7. 习題	178
第十章 АПВ与继电保护装置协同工作的特点	178
10-1. 在АПВ装置动作后感应电动机的自启动	178
10-2. 继电保护装置在АПВ前及АПВ后加速动作	187
10-3. 利用无选择性继电保护和АПВ装置的协同工作达到快速而有选择地切除故障	188
10-4. 在供电线上設置АПВ装置而在受端变电所高压侧不装設开关	191
10-5. 在BB-110型空气开关上实现АПВ后加速的特点	192
10-6. 环状电网中线路继电保护的簡化	193
10-7. 結論	194
10-8. 习題	195
第十一章 备用电源的自动投入 (ABP)	196
11-1. 概述	196
11-2. ABP装置的結线图	197
11-3. 在ABP装置动作以后, 发电厂厂用感应电动机的自启动	202
11-4. 采用ABP装置时一次結线方式和继电保护的簡化	206
11-5. 在遙控变电所的降压变压器上設置ABP装置的特点	209
11-6. 发电厂及变电所中电动机和其他輔助设备的ABP	211
11-7. 結論	212
11-8. 习題	212
参考文献	214

上篇 預防及消除系統事故的自动裝置

第一章 同步电机的自动調节励磁 (APB)

1-1. 决定自动調节勵磁与快速切除短路在保持同步电机并列运行的穩定度方面的动作效果之基本关系式

首先研究同步发电机与大容量动力系统并列运行的条件 (图 1-1)。令发电机的电势为 E_d ，大容量 (无限大) 系統中变电所 C 的母线电压为 U ，发电机电势与变电所 C 的母线之间的电抗为 x_{12} 。

通过电抗 x_{12} 的电流 I_{12} 和发电机送入系統的有功功率 P 分别等于，

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_d - \dot{U}}{x_{12}} = \frac{SM}{x_{12}}, \quad (1-1)$$

$$P = UI_{12} \cos \varphi. \quad (1-2)$$

从向量图 1-1, δ 可以看出，在三角形 MSN 中，角 $MSN = \varphi$ ，而线段 $SN = SM \cos \varphi$ 。

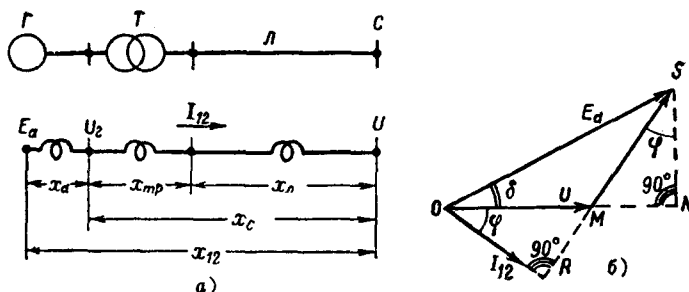


图 1-1 系統內同步发电机的工作图
a—等值电路图；b—向量图

因为从公式 (1-1) 得 $SM = I_{12}x_{12}$ ，而从三角形 ONS 得 $SN = E_d \sin \delta$ ，所以 $E_d \sin \delta = I_{12}x_{12} \cos \varphi$ 。考虑到公式 (1-2)，可得，

$$P = \frac{UE_d}{x_{12}} \sin \delta. \quad (1-3)$$

如果 U 和 E_d 分别代表相間电压和相間电势，則由公式 (1-3) 即可算出三相功率。可能发送的最大有功功率 P_m 是在 $\sin \delta = 1$ 时，亦即，

$$P_m = \frac{UE_g}{x_{12}} \quad (1-4)$$

及

$$P = P_m \sin \delta. \quad (1-5)$$

公式(1-3)未考虑阻抗中有功分量(电阻 r_{12})的存在,当定性地分析并列运行的稳定问题时,可以采取这一假定。

根据公式(1-5),送入系统的电功率可以用正弦曲线1来表示(图1-2)。

正常条件下是在角度 $\delta_n < 90^\circ$ 的情况下运行的,这样就能在出现各种可能的负荷变动时保证系统的稳定。消耗的功率 P_0 取决于直线3,而角度 δ_n 则由直线3和正弦曲线1的交点a的横坐标来决定。

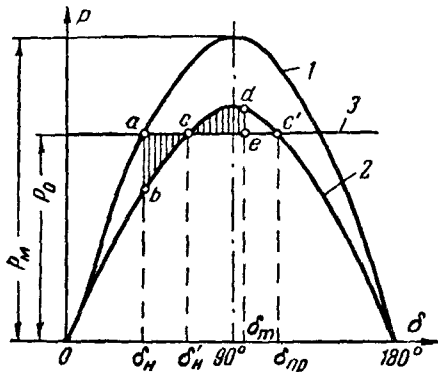


图 1-2 当发电机接在无限大系统母线上运行时的功角特性曲线

当电压平稳下降或负荷缓缓增加时, δ 角将逐渐张大。一旦张大到 90° ,平衡状态便开始不稳定,即静稳定被破坏。

当短路过程中电压剧烈下降时,或在正常运行方式发生变化的过程中(发生短路时以及切除穿越性联络线后)电抗 x_{12} 突然增大时,即使随后短路被切除并且穿越性联络线重新投入,稳定仍可能遭受破坏。此时,能否维持稳定要视消除非正常运行方式的速度以及随之出现的事故后运行情况而定。正是这些因素决定了动稳定。

当电功率骤然变化而功角特性由曲线1过渡到曲线2时(图1-2),涡轮机的调速器来不及调节进水量或进汽量。于是,在作用于机轴上的机械功率与其所发送的电功率之间便出现了彼此不相适应的情况。发电机开始加速,从而使 δ 角张大而在c点达到平衡。然而由于转子的惯性,还要向前推进一个角度直到 δ_m ;此时电功率大于涡轮机的功率,从而发电机开始被制动。这样,在经过若干个衰减性振荡之后, δ 角便停留在和新的稳定状态相对应的角度 δ'_n 上。但是一旦 δ_m 角大于曲线2的下垂段上的极限角 δ_{np} ,则将出现另外一种情况。此时,剩余力矩的符号将改变,从而导致转子进一步加速。于是发电机便失去同步而过渡到异步运行方式。

在异步运行过程中,和方向交变的同步力矩一起,还出现一个在大小上与失去同步的发电机的滑差数值及其构造有关的异步力矩。

在这些力矩的作用下,经过几个异步旋转以后,失去同步的发电机在逐渐接近同步转速的条件下,终于被重新拉入同步(亦即恢复同步运行)。

能否防止失去同步并出现异步过程,要视在 δ_m 角不超过 δ_{np} 角的前提下,加速面积与制动面积能否相等。可以按以下的考虑来决定为约略计算切除短路的最大允许时间(根据维持动稳定的条件)所使用的近似公式。假定当发生短路时,发电机将负荷全部甩去而调速器又不能及时而有效地改变涡轮机的进汽量或进水量,于是在转子轴上便出现为剩余功率所决定的剩余力矩,它等于

$$\Delta M \approx \frac{\Delta P}{\omega_n} = \frac{P_{\text{Hазр}}}{\omega_n}. \quad (1-6)$$

式中 取略等号，因为其中假定角速度 ω 为常数，并令其等于对应于频率为50赫的额定角速度。

转子相对运动的角加速度正比于所承受的剩余力矩 ΔM 而反比于机组（发电机加涡轮机）的转动惯量 J ：

$$\alpha = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\Delta M}{J}, \quad (1-7)$$

或

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_{\text{Hазр}}}{J \omega_n}. \quad (1-8)$$

机械时间常数（或叫作惯性时间常数）等于

$$T_{\text{un}} = \frac{J \omega_n^2}{P_n} \quad (1-9)$$

式中 P_n ——发电机的额定容量，千瓦。

于是公式（1-8）可以另写作：

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_{\text{Hазр}}}{P_n} \frac{\omega_n}{T_{\text{un}}}. \quad (1-10)$$

角速度的变量决定于公式

$$\Delta \omega = \frac{d \delta}{dt} = \frac{P_{\text{Hазр}}}{P_n} \frac{\omega_n}{T_{\text{un}}} t,$$

或

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_n} = \frac{1}{T_{\text{un}}} \frac{P_{\text{Hазр}}}{P_n} t, \quad (1-11)$$

而 δ 角的变量为

$$\delta_{12} = \frac{1}{2} \frac{P_{\text{Hазр}}}{P_n} \frac{\omega_n}{T_{\text{un}}} t^2 \quad \text{弧度}. \quad (1-12)$$

机组（发电机-涡轮机或电动机-被驱动的机械）的惯性时间常数 T_{un} 取决于其结构参数及转速：

$$T_{\text{азр}} = \frac{2.74 G D^2 n^2}{P_{\text{азр}}} \cdot 10^{-3} \text{秒},$$

式中 $G D^2$ ——飞轮转矩，吨米²；

n ——机组转速，转/分；

$P_{\text{азр}}$ ——机组额定容量，千瓦。

例如：在额定转速下（即在 $f=50$ 赫的额定频率下），对于以В. И. 列宁命名的伏尔加水电站的水轮发电机组，共 $T_{\text{un}}=17$ 秒，对于高尔基和雷宾斯基水电站的水轮机组， $T_{\text{un}}=12$ 秒，对于汽轮发电机组 $T_{\text{un}} \approx 10$ 秒，对于同期调相机 $T_{\text{un}} \approx 5$ 秒。

由发电机和涡轮机或电动机和被驱动机械所组成的机组，其惯性时间常数分别取决于发电机的 $T_{ин.ген}$ 与涡轮机的 $T_{ин.турб}$ 或电动机的 $T_{ин.дв}$ 与被驱动机械的 $T_{ин.мех}$ 的时间常数之和。

如果把惯性时间常数归算到某一基础容量，则得：

$$T_{ин.баз} = T_{ин} \frac{P_{но.м}}{P_{баз}}$$

整个系统全部旋转机械的惯性时间常数决定于下式（文献3-1）：

$$T_{ин.сист} = \frac{\Sigma(T_{ин.ген} + T_{ин.турб})P_{ген} + \Sigma(T_{ин.дв} + T_{ин.мех})P_{дв}}{P_{нагр}}, \quad (1-13)$$

式中 $P_{нагр}$ ——负荷的额定功率。

表1-1 列出某些型式的汽轮机、汽轮发电机组和水轮发电机组的惯性时间常数。水轮机的惯性时间常数不大，其转动惯量平均约为发电机的10%，而对巨型水轮发电机来说则不超过2~3%。

表1-1

汽轮机型式	惯性时间常数 (秒)	汽轮发电机型式	惯性时间常数 (秒)	水轮发电机		惯性时间常数 (秒)
				额定容量 (千伏安)	额定转速 (转/分)	
AK-25-1	3.6	T-2-3,5-2	3.53	4,000	214	3.45
AT-25-1	3.6	T-2120/70	5.13	4,280	375	2.97
AT-25-2	3.5	T-2-6-2	5.36	4,650	375	2.82
АП-25-1	3.94	T-6-2	5.40	10,000	250	4.27
AK-50-1	3.2	T-2140/80	7.40	15,000	167	6.36
AK-50-2	4.6	T-2-12-2	4.95	18,700	187.5	6.67
АП-50-1	5.65	T-12-2	7.40	30,000	75	7.71
AK-100-1	4.35	T-2210/87	8.20	33,000	375	7.00
БК-50-1	4.32	T-2-25-2	3.95	37,000	167	7.22
БК-100-2	4.62	T-25-2	7.60	40,000	83.2	6.17
		T-2270/98	7.90	47,500	167	9.64
		T-2-50-2	6.64	69,000	62.6	7.30
		T-50-2	6.00			
		T-4376/142	5.73			
		T-2-100-2	5.68			

根据实验资料，厂用机械的惯性时间常数是：对于送风机和吸风机， $T_{ин} = 6 \sim 15$ 秒；水泵， $T_{ин} = 2 \sim 6$ 秒；磨煤机， $T_{ин} = 2 \sim 3$ 秒。

如果夹角 δ_{12} 用度表示，则公式 (1-12) 可以写成：

$$\delta_{12}^{\circ} = 2\pi f \frac{360}{2\pi} \frac{1}{2T_{ин}} \frac{P_{нагр}}{P_{н}} t^2,$$

当 $f = 50$ 赫时：

$$\delta_{12}^{\circ} = 9,000 \frac{1}{T_{ин}} \frac{P_{нагр}}{P_{н}} t^2, \quad (1-14)$$

当针对具体系统实际计算稳定问题时，乃使用分段计算的方法：假定剩余力矩只在一段很短的时间内才是常数。在这段时间内机组的转子既然作等加速运动，便可决定其角增量 $\Delta \delta_{12}$ 。此后，再计算与变动后的 δ 角相对应的新的剩余力矩，然后再对下一小段时间

进行计算。近年来大多利用系统的动态模拟和计算机来研究稳定问题。

1-2. 同步电机的APB装置的用途和实现特点

同步电机的自动调节励磁装置通过改变发电机励磁电流的方法使动力系统的电压维持在给定的特性曲线上；当电压降低时，同步电机的励磁电流可以一直增加到为励磁机构造所决定的最大值（顶值）。

APB装置随发电机定子电流和端电压的不同或随这些量的变化速度及加速度的不同而自动地改变发电机的电势 E_a ①。

当为大量同步电机装设 APB 装置以后，将能大大提高动力系统的稳定及过载能力，并改善事故后的运行情况。在事故以后，由于感应电动机在短路时电压下降过程中的制动，将在系统各元件内产生大量的无功电流。

分析当发电机电势维持不变而 δ 角增大时，其端电压的变化的向量图（图 1-3, a），可以看出 APB 装置对于提高静态稳定的极限所起的作用〔文献 1-1〕。

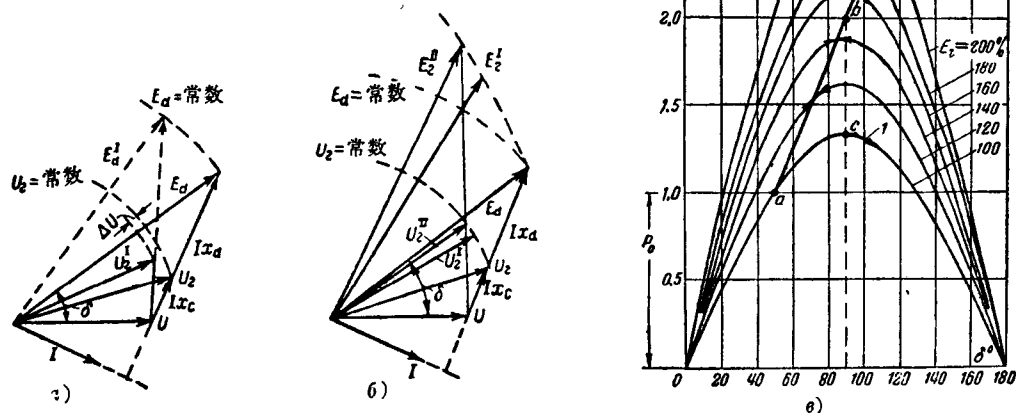


图 1-3 APB 装置的工作对于提高静态稳定极限所起的作用

a—当 $E_a =$ 常数而 δ 角增大时，发电机端电压的变化；

b—当发电机端电压维持不变而 δ 角增大时，发电机电势的变化；

c—当 $U_e =$ 常数时的功角特性曲线

发电机的端电压决定于向量 U_e ，此向量的端点将线段 UE_a 划分为正比于发电机同步电抗 x_d 及系统其余部份电抗 x_e 的两个线段。

随着 δ 角的增大，电势向量移到 E_a^I 的位置，而端电压则由向量 U_e^I 来决定。

此时

$$\frac{|E_a - U_e|}{|U_e - U|} = \frac{|E_a^I - U_e^I|}{|U_e^I - U|}$$

① 目前正进行研究及试验的所谓“强作用式调节器”就是对励磁调节过程中电流和电压数值的变化速度及加速度进行测量的。

按绝对值比较:

$$|\dot{U}_z'|, \text{ 小于 } |\dot{U}_z|, \text{ 即:}$$

$$|\dot{U}_z| - |\dot{U}_z'| = \Delta U.$$

如果在发电机的端电压下降时, 利用 APB 装置增加励磁机的励磁电流, 以使电势提高到令 ΔU 恰好等于零的数值, 则此时电压和电势的向量图相当于图 1-3, 6。发电机电势 E_z 将不等于 E_d 而是被大大地提高了。此时, 功角特性曲线改为曲线 2 (图 1-3, a)。

这条曲线的纵坐标值大大超过了相应于 $E_d = \text{常数}$ 的曲线 1。当 δ 角增大到 90° 时, 功率增大 $\Delta P = P_b - P_c$ 。

图 1-4 中分别表示在具备及不具备 APB 装置时, 系统于切除短路后的电压变化情况 [文献 1-1]。短路的持续时间为 0.7 秒。当没有 APB 装置时 (图 1-4, a) 电压恢复得很慢, 而在切除短路时用户的电动机即已停止转动。当具备 APB 装置时 (图 1-4, b), 则系统能在很短的时间内恢复其正常运行方式。

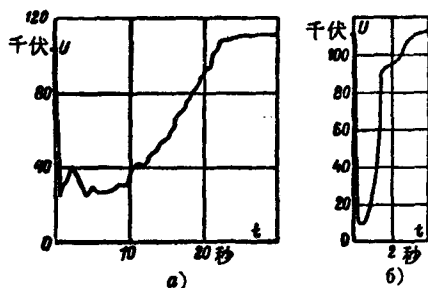


图 1-4 切除短路后, 系统电压的变化曲线

a—当没有 APB 装置时;

b—当装有 APB 装置时

APB 装置还提高了动力系统继电保护装置工作的精确度。

短路时发电机的电势和短路电流的数值都将随时间而衰减。

因此, 按短路电流周期分量初始值进行计算和整定的慢动作继电保护装置, 如果不采取特殊的措施, 就有可能拒绝动作。

发电机的电势将在强行励磁及 APB 装置的作用下增大, 从而补偿了它的衰减。因此, 在具备 APB 和强行励磁装置时, 即使短路经过 0.2~0.5 秒方被切除, 只要不出现各台并列运行

发电机的电势向量互相分离的情况, 继电保护通常都是按短路电流周期分量的初始值 I_k' 来整定的。在更精确的计算中, 乃考虑到短路电流系按照计入 APB 装置的作用的特殊衰减曲线随时间而衰减。

并列运行发电机的电势向量的互相分离, 对保护装置的工作影响极大。而 APB 装置可以缩小电势向量的夹角 δ , 从而提高了保护装置工作的精确度。此外, 在某些情况下, APB 装置还可降低对于继电保护的振荡闭锁装置的要求, 有时并允许延长切除短路的时间。

但应指出, 将装设 APB 装置与快速切除短路的要求对立起来是不正确的, 因为这两项措施在提高系统运行的可靠性方面是相互补充的。若以很长的时限切除短路, 可能导致电势夹角的严重分离和系统无功电流的大量过载, 以致 APB 装置也将难于防止系统稳定遭受破坏、甚至全部崩溃。

1-3. 与电磁式电压校正器配合使用的同步发电机复式励磁装置

目前在许多电厂中使用带电磁式电压校正器的复式励磁装置，以进行自动调节励磁。

图 1-5 介绍与电磁式电压校正器配合工作的复式励磁装置〔文献 1-2 和 1-19〕。发电机的复式励磁的作用是：通过将定子电流（实际上是定子电流的二次电流——译者）整流后叠加到励磁机的自激电流上，以达到根据发电机定子电流的变化来改变其转子电流的目的。根据图 1-3, a ，没有装复式励磁的发电机的端电压等于：

$$U_2 = E_d - I x_d. \quad (1-15)$$

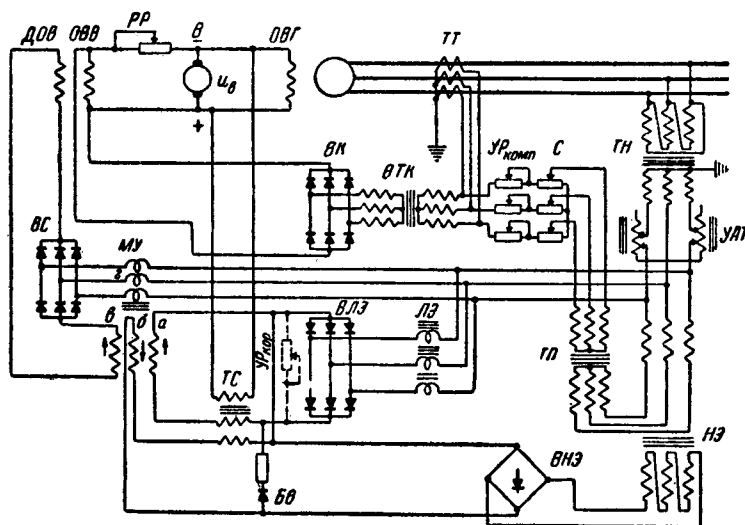


图 1-5 带电磁式电压校正器的复式励磁接线图

OBΓ—励磁机励磁线卷，B—励磁机电枢，OBB—励磁机的主线卷；DOB—励磁机辅助线卷，PP—调节变阻器，TH—电压互感器，TT—电流互感器；YAT—调节自耦变压器；УРКОМН—校正器的调节变阻器；HЭ—校正器的非线性元件，BHЭ—非线性元件的整流器，ЛЭ—校正器的线性元件；БЛЭ—线性元件的整流器，ББ—闭锁整流器；MY—校正器的磁放大器；BC—磁整流器；TC—稳定变压器；ТП—中间隔离变压器；BTK—复励变压器；BK—复励整流器；УРКОМН—复励调节变阻器；C—有差度调节装置的变阻器

当电势不变而 x_d 为常数时，发电机的外特性决定于图 1-6 中的直线 1。如果复励系数（即决定发电机的定子电流与将整流过的定子二次电流补送给励磁线卷以后发电机所附加的端电压之间关系的系数） $k = x_d$ ，则外特性曲线决定于直线 2。

实际上，为了保证并列运行的发电机之间的无功负荷按既定的比例进行分配， $k \neq x_d$ ，而外特性曲线具有一定的倾斜度（有差度）。此外还应注意：发电机的感抗在短路过程中是变化的。

在接线图 1-5 中复式励磁装置的元件包括：电流互感器 TT；复励调节变阻器 УРКОМН；整流变压器 BTK 和磁整流器 BK。

在同一个电势 E_d 和同一个定子电流 I_{cm} 下，如果负荷的功率因数角 φ_n 不同，则发电机的端电压也将有不同的数值（图 1-7, a ）〔文献 1-3〕。因此，装有复式励磁装置的

发电机（以下简称复励发电机）的外特性曲线（图1-7, б）又与负荷的 $\cos \varphi$ 值有关。

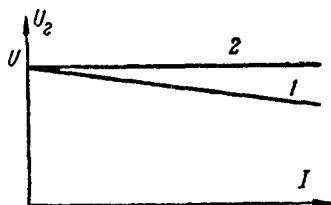


图 1-6 发电机的外特性曲线

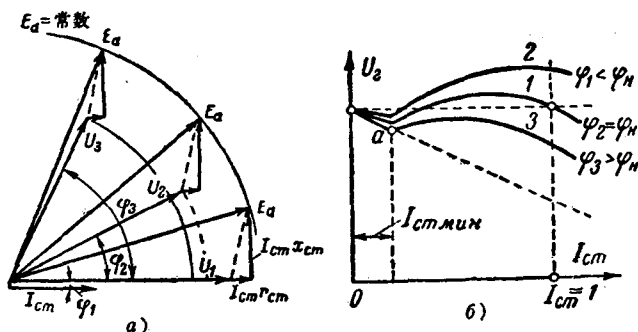


图 1-7

a—在不同的负荷角 φ_N 下发电机电流和电压的向量图；

б—当 $\cos \varphi$ 值不同时复励发电机的外特性曲线

当定子电流 I_{cm} 很小时，整流器出口电压低于为励磁机电势所决定的该励磁机励磁线卷的端电压。因此，在 a 点（即所谓复式励磁的起点）之前，复励发电机和无复励的发电机的外特性曲线是吻合的。

如果励磁机具有两个独立的励磁线卷，一个由整流器的整流电流馈电，另一个则为励磁机的并激线卷，就可以消除上述缺点。

电磁式电压校正器能够保证在不同的 $\cos \varphi_N$ 下使复励发电机的端电压维持不变。

电磁式电压校正器（图1-5）是一种电压调节装置。它由测量元件（用来确定电压互感器 TH 的端电压偏离给定值的差额）和放大元件（受测量元件控制并保证校正器输出电流的必要特性）组成。校正器通过自耦变压器 YAT 连接到电压互感器 TH 上，利用该自耦变压器来整定调节过程中所要维持的电压水平。

校正器的测量元件由星形-开口三角形接线的中间变压器 $H\Theta$ 及铁心具有空气隙的三

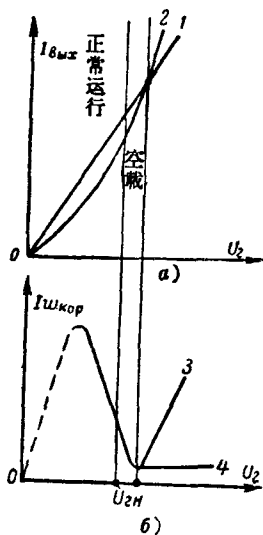


图1-8 阐明顺接的电磁式电压校正器动作原理的曲线

相塞流线圈 $Л\Theta$ （或三个单相的塞流线圈）组成。当电压接近额定值时，变压器 $H\Theta$ 的铁心饱和。因此，其接成开口三角形的线卷的输出电压——等于变压器 $H\Theta$ 各相二次电压的几何和——将不再等于零，而出现含有高次谐波的电压，同时有电流通过整流器 $BH\Theta$ 。当变压器 $H\Theta$ 的一次电压比较低时，不平衡电压和流过整流器的电流（输出电流）也都不大，而当其一次电压上升时，铁心的饱和程度就随之增大，从而使不平衡电压及输出电流急剧地增加。

关系式 $I_{BLX} = f(U_2)$ 是非线性的（图1-8, a曲线2）。电压互感器 $H\Theta$ 连同整流器 $BH\Theta$ 一起叫做校正器的非线性元件。塞流线圈 $Л\Theta$ 的铁心在非饱和状态下工作，因此整流器 $BЛ\Theta$ 的输出电流正比于所加的电压（图1-8, a直线1）。塞流线圈 $Л\Theta$ 和整流器 $BЛ\Theta$ 叫做校正器的线性元件。

磁放大器 MY 比较线性及非线性元件的输出电流，并对流入励磁机附加励磁线卷 $ЛOB$ （图1-5）内电流的数值进行加工。