

自动化丛书

同步电动机激磁自动调节

〔苏联〕Д. П. 别捷林著 周永刚译

上海科学技术出版社

73.2536
290

自动化丛书

33

同步电动机激磁自动调节

〔苏联〕Д. И. 别捷林 著

周永刚 译 赵安泰 校

zk611/321
zk611/321

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书研究工业同步电力拖动激磁自动調节的規律和在激磁調节情况下同步电动机的工作方式。对带有和不带电机激磁机的同步电动机激磁自动調节的現代化系統和元件进行了論述。同时还研究了同步电动机在起动和再同步情况下激磁自动控制的原埋。

本书可供从事于同步电力拖动設計和运行工作的工程技术人员参考。

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. П. Петелин

Госэнергоиздат • 1961

自动化丛书(33)

同步电动机激磁自动調节

周永刚 譯 赵安泰 校

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海市印刷六厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 3 4/32 排版字数 67,000

1964 年 7 月第 1 版 1964 年 7 月第 1 次印刷 印数 1—9,000

統一书号 15119.122 定价(科六) 0.38 元

前 言

提高功率因数和改善供电系统与电能用户的技术经济指标最有效的方法之一，就是采用带有激磁自动调节的同步电动机。本书涉及研究同步电动机的激磁自动调节问题和它在起动时激磁的自动控制。书中叙述了采用激磁自动调节系统时同步电动机的工作方式，以及带有和不带电机激磁机的激磁自动调节系统构成原理。研究同步电动机激磁自动调节的一些动力学问题，与同步电动机在起动和再同步时激磁自动控制的原理。本书试图向读者介绍同步电动机激磁自动调节的各项最新课题与一些现已应用的激磁自动调节系统及其元件。全书共有五章。

第1章综述在工频线路中工作的同步电动机激磁自动调节的各项课题，探讨各种工作方式并有示例和建议。

第2章研究带有电机激磁机的同步电动机激磁自动调节系统。

第3章叙述不带电机激磁机的同步电动机激磁自动调节系统。

第4章阐述强迫激磁的选择问题，同步电动机激磁自动调节系统的稳定性（静态稳定性），并且指出了研究同步电动机激磁自动调节系统（动态稳定性）的方法。

第5章讲解同步电动机起动和再同步时的激磁自动控制原理。

目 录

前 言

第 1 章 采用激磁自动调节的同步电动机的工作方式	1
1. 問題概述	1
2. 計算帶激磁自动调节的同步电动机工作方式的基本原理	7
3. 保持供电变电站母綫电压恒定的同步电动机激磁调节规律	11
4. 保持电动机輸出无功功率恒定的激磁调节规律	16
5. 保持功率因数 $\cos \varphi$ 恒定且損耗最小的同步电动机激磁调节规律	20
6. 根据內移角 Θ 自动调节激磁时同步电动机的工作方式	23
7. 根据定子电流自动调节激磁时同步电动机的工作方式	26
8. 对选择同步电动机激磁自动调节规律的几点意見	30
第 2 章 带电机激磁机的同步电动机激磁自动调节系統	35
9. 保持电动机端电压恒定的激磁自动调节系統	35
10. 保持輸出无功功率恒定和功率因数恒定的同步电动机激磁自动调节系統	39
11. 同步电动机激磁根据角度 Θ 自动调节的系統	42
12. 同步电动机激磁根据定子电流自动调节的系統	44
第 3 章 不带电机激磁机的同步电动机激磁自动调节系統	48
13. 利用离子变流器进行脉冲控制的同步电动机激磁自动调节系統	49
14. 帶整流接触式激磁调节器的同步电动机	56
15. 复激磁同步电动机	58
16. 帶机械整流器的同步电动机	62
第 4 章 同步电动机激磁自动调节的某些动力学問題	65

第5章 同步电动机起动和再同步时激磁的自动控制	79
17. 同步电动机各种起动和再同步方式的一般特性	79
18. 带固接激磁机的同步电动机的激磁和同步	82
19. 同步电动机起动和再同步时激磁自动控制的原理	84
参考文献	90

第 1 章

采用激磁自动调节的同步电动机的工作方式

1. 問題概述

同步电动机由于其本身结构的特点和具有高技术经济指标,在工业中应用日广。如在泵和送风设备、气体和空气鼓风机等这些具有平稳负载曲线的工作机械中一样,同步电动机也应用在各种具有明显变化负载机械的拖动中。例如矿山工业中的圆锥式、颚式和锤式破碎机,球磨机和棒磨机,化学工业中的橡胶混合器,石油采油场中的钻机,金属的剪床和锯床,连续式轧钢机,往复式压缩机,可逆轧钢机交流设备的拖动,矿井卷扬机,高炉装料卷扬机,大功率挖掘机和许多其他机械^[33,43~45]。

应用最广的是功率在 200 千瓦及以上的大、中功率同步电动机。但是,阿塞尔拜疆石油采油场中使用不带电机激磁机的同步电动机的运行经验表明^[15,16],同步电动机的应用范围可以扩大到一定的小功率,如 10~50 千瓦。因为上述机械中大部分的负载特征是轴上的功率变化较大,从近于空载功率值可变化到额定功率值的 2~3 倍。因此,同步电动机在激

磁不变的情况下，其无功功率将产生急剧的变化。这对电动机的损耗和转矩的利用以及供电电网都将引起一系列不良的现象，促使无功能量输出降低，电网中产生附加能量损耗以及供电系统中电压波动等。这种电力拖动直到最近由于设计了惯性拖动才得到比较满意的工作。但是，在这种情况下，往往需要采用非系列、特殊设计、提高容量的同步电动机。现代解决这类任务的途径是采用同步电动机激磁自动调节，这种激磁自动调节可以使电动机得到充分利用，同时也能保证供电系统具有良好的技术经济指标。

在变化负载情况下工作的同步电动机，其激磁调节之所以合理是出于以下的考虑。当轴上的功率变化很大时，为保证同步电动机具有足够的动态稳定性，在有负载的时间内，激磁必须保持在最高水平。同样，为保证同步电动机具有良好的经济和能量指标，在不带负载的时间内，激磁电流应适当减小。如果研究一下同步电动机的总损耗公式，上述情况即可以得到证实。总损耗公式具有下列形式

$$\Sigma P = P_{\text{н}} + P_{\text{с}} = I^2 r + i_{\text{с}}^2 r_{\text{с}} + k_{\text{с}} \Phi^2 \quad (1)$$

式中 $P_{\text{н}} = I^2 r + i_{\text{с}}^2 r_{\text{с}}$ ——电机的铜损，由定子绕组和激磁绕组的热损耗构成；

$P_{\text{с}} = k_{\text{с}} \Phi^2$ ——电机的铁损。

在负载降低且激磁电流不变时，通常电动机具有超前的 $\cos \varphi$ 。这时，电枢反应的磁通是加强磁化，电机的总磁通增加。因此，电机中和 Φ^2 成正比的铁损大大增加。在这种情况下，激磁绕组中的热损耗 $i_{\text{с}}^2 r_{\text{с}}$ 保持不变，而定子绕组中的损耗 $I^2 r$ 则减小了，虽然由于激磁方式的不同，可以保持在原有的水平或甚至由于无功电流的作用而有所增加。很明显，当负载减小时，同步电动机激磁的减小使电机的总损耗减小，结

果，其发热也减小。因之，当电动机轴上严重过载时，为了提高动态稳定性，可以在激磁绕组中给予最大的电流而无须担心其过热。因为同步电动机的转矩由下列关系式确定

$$M = \frac{mU_n E}{\omega_c x} \sin \theta \quad (2)$$

很明显，根据负载调节其激磁就可以改善电动机转矩的利用。

为了保证供电电网具有高技术经济指标，要求同步电动机向电网输出最大的无功能量。输出的无功能量值应当根据供电电网的工作方式和同步电动机的负载而有所变化，这一点利用同步电动机根据一定的规律进行激磁自动调节即可达到。因此，同步电动机的激磁自动调节对于研究工业企业电网中电压局部调节的问题有很大帮助。

利用同步电动机的激磁自动调节可以消除系统某些环节电压降低时无功功率不足的现象。这样即给异步电动机、也给同步电动机的直接起动和自起动创造了有利条件。

同步电动机激磁自动调节的任务与拖动装置的具体工作条件有关，与电压严重降低时保证供电系统稳定性的要求有关，与电压局部调节的要求有关。解决这一任务的方向是选择激磁调节的规律和自动调节系统的设计原则。

同步电动机在变化负载的拖动装置中应用时，有很多不同的方式，它们可以分为3类：(1)与工作机械的负载曲线类型有关的；(2)与接到供电给同步电动机的变电站母线上的负载特性有关的；(3)与改善电动机及供电系统工作方式的任

务有关的。

第(1)类都是功率达数千以至数万千瓦的同步电力拖动装置，它们是供电变电站母线上唯一的电能用户，或者至少也是电能的主要用户。典型的负载曲线是可调节的冲击负载

(如軋鋼機, 往復式壓縮機等的拖动)。改善工作方式的任務在於保證電動機的穩定性和經濟性, 保證電網中能量的損耗最小和使電網中電壓的波動最小。

第(2)類是功率在數百到數千千瓦的同步電力拖动裝置, 變電站母綫供電給同步電動機的同时還供電給其他類型具有可比容量的負載(主要是異步電動機)。同步電力拖动裝置的負載曲綫可以是可調節的, 也可以是不可調節的。工作延續時間與停歇時間相比, 可以是小的, 也可以是大的(如型鋼連續式軋機, 礦山深井卷揚機以及其他許多拖动裝置)。在這種情況下, 同步電動機激磁調節的目的是改善該變電站母綫上所有電能用戶的技術經濟指標。

第(3)類是一些中小功率(200 千瓦以下)的同步電力拖动裝置, 其總安裝功率可以為企業全部安裝功率的一半或一半以上。負載曲綫通常變化明顯, 時間不同。對於這一類拖动裝置, 同步電動機激磁調節所要解決的任務是在能量損耗最小的情況下提高企業電力裝置的功率因數。工業企業電網中電壓局部調節的任務可以通過同步電動機的激磁調節來解決, 這些同步電動機可以工作於恒定的負載, 也可以工作於變化的負載, 但這時必須採用電動機激磁按電壓自動調節的系統。

顯然, 在每個具體情況下, 為了合理地設計自動電力拖动, 要求同時考慮許多因素。選擇拖動的類型及其電氣機械參數的自動調節系統只有在比較技術經濟的基礎上才能最終地作出決定。設計自動同步電力拖动時, 應當對投資、電能損耗、運轉費用進行比較。此外, 還應當考慮同步電動機某些特殊的特性。例如當事故電壓降低時進行電壓調節和提高無功功率的可能性。還應當看到, 採用保持供電變電站母綫電

压恒定的激磁自动调节的同步电动机，从技术经济指标的角度来看，还给其他电能用户创造了良好的工作条件。文献[45]对同步电动机技术经济的优越性有详细的论述。

同步电动机的激磁自动调节设备与整个激磁系统密切地关联着。电动机激磁增长速度对激磁系统一般没有特殊的要求(100到1000千瓦的电动机按ГОСТ8585-57, 1000千瓦以上的电动机按ГОСТ8704-58)。只有在负载剧烈变化下工作的同步电动机激磁系统例外，在这种情况下，照例，激磁系统应当保证有实现电动机强行激磁的可能性，此时激磁回路的电压和电流应当最大，且激磁电流达到最大限值的时间应当最短，后者取决于采用电压上限值高的激磁机，而这将使激磁机的尺寸加大很多。然而，对于功率在10000千瓦以上具有冲击负载的同步电力拖动，采用大功率的电机激磁机在某些情况下已经证明是完全正确的。利用可控汞弧整流器作激磁机在很多情况下可以更容易地解决同步电动机强行激磁的任务。实际上，能满足电动机激磁按给定规律，例如 $Q=\text{常数}$ ，进行调节所要求的强激系数的平均值在过渡状态下为3~5。在这种强激的情况下，激磁调节时间较冲击负载持续的时间要小好几倍。冲击负载持续的时间，例如在型钢连续轧机的拖动中平均为60~100秒，在高炉料斗卷扬机和变流设备的拖动中平均为5~10秒。

为了提高激磁的可靠性和增大最大激磁电流，建议在激磁系统中尽量避免采用任何继电器接触式元件和附加电阻。应当广泛采用将激磁机和调节器与激磁绕组固接的接法。

对同步电动机激磁自动调节系统有下列基本要求：

- (1) 当供电电网工作方式改变时能保持稳定工作；
- (2) 保证在给定工作方式下的稳定性；

(3) 进行調节所依据参数的測量要简单且可靠，測量元件变送器要灵敏度高；

(4) 調节器和整个激磁調节系統具有高度的運轉可靠性；

(5) 由調节器本身或激磁調节系統各个元件的慣性所引起的时滯应当尽可能小。

借同步电动机按下列参数进行激磁自动調节，可使电动机及供电系統保持所需要的工作方式。这些参数是电压 U ，无功功率 Q ，电流和电压的相位角 φ ，定子的有功电流 I_a 和总电流 I ，以及定子和轉子磁場軸綫的內移角 θ 。調节系統可作成直接作用的（这时，同步电动机激磁的調节由敏感元件的能量来实现），也可作成間接作用的（这时，同步电动机激磁的調节由中間放大器的能量来实现），可以装有直接測量被調量的变送器，也可以装有利用間接的方法測量被調量的变送器。

在根据所要求的工作方式解决电动机和供电系統的經濟性和稳定性問題时，要考虑下列同步电动机激磁調节規律：

(1) 电动机的激磁調节在供电变电站母綫电压恒定情况下进行，并受轉子最大及最小电流的限制；

(2) 电动机的激磁調节按輸出无功功率恒定，即 $Q = \text{常数}$ 情况下进行；

(3) 电动机的激磁調节按功率因数恒定，即 $\cos \varphi = \text{常数}$ 情况下进行；

(4) 电动机按內移角 θ 进行激磁調节；

(5) 电动机按定子电流 I 进行激磁調节。

为考虑改善現有同步电力拖动技术經濟指标的可能性和在設計能同时保証供电系統具有良好工作方式的新系統时考

考虑这些指标的可能性, 采用同步电动机激磁自动调节是适时的并具有现实性。

2. 计算带激磁自动调节的同步电动机 工作方式的基本原理

为了对带有激磁自动调节的同步电动机工作方式进行数学的计算, 必须确定一系列决定激磁系统中电压、电流和电动机过载能力的各种关系式, 使可用以计算电动机的工作特性和供电电网工作方式的主要技术经济指标 (如向电网输送的无功能量, 供电变电站母线电压的波动, 电网中能量的损耗等)。确定这些关系式可根据隐极同步电动机的简化矢量图 (图1)。磁饱和对电动机参数的影响可以忽略不计。在必要时 (例如在确定电动机的过载能力和工作特性时) 可以利用绘制 Потье 图和辅助调节特性曲线族来考虑磁饱和的影响^[34]。

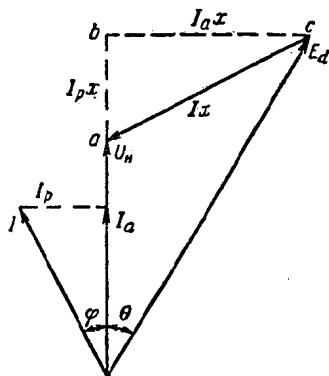


图1 同步电动机的简化矢量图

使用图1的简化矢量图时, 要求电动机中没有有功损耗, 在有些情况下, 例如在计算复激磁同步电动机工作方式时, 这样会引起明显的误差。供电电网的电压必须是不变的, 并等于额定电压。采用这些假设在实际工作上对带有激磁自动调节同步电动机工作方式进行质和量的估计时具有足够准确度^①。确定所需的相互关

① 在必须利用精确的关系时, 在叙述过程中, 将指出所引用的参考文献。——原注

系已在文献[13, 17, 34]中有所阐述。

根据电动机的矢量图(图 1)确定下列关系式

(1) 电动机定子电流的无功分量

$$I_p = \frac{\overline{ab}}{x} = \frac{E \cos \Theta - U_H}{x} \quad (3)$$

而在额定工作方式时

$$I_{p.H} = \frac{E_H \cos \Theta_H - U_H}{x} \quad (4)$$

式中 E ——同步电动机的电势；

Θ ——电动机的内移角；

U_H ——定子的端电压；

x ——电动机的同步电抗。

(2) 电动机定子电流的有功分量

$$I_a = \frac{\overline{bc}}{x} = \frac{E \sin \Theta}{x} \quad (5)$$

而在额定工作方式时

$$I_{a.H} = \frac{E_H \sin \Theta_H}{x} \quad (6)$$

(3) 无功功率, 以相对单位表示

$$q = \frac{Q}{Q_H} = \frac{I_p}{I_{p.H}} = \frac{E \cos \Theta - U_H}{E_H \cos \Theta_H - U_H} \quad (7)$$

(4) 电动机轴上的功率, 以相对单位表示

$$P = \frac{P}{P_H} = \frac{I_a}{I_{a.H}} = \frac{E}{E_H} \frac{\sin \Theta}{\sin \Theta_H} = \varepsilon k_H \sin \Theta \quad (8)$$

式中 $\varepsilon = \frac{E}{E_H}$ ——电动机的电势, 以相对单位表示；

$k_H = \frac{P_{\text{max},H}}{P_H} = \frac{1}{\sin \Theta_H}$ ——同步电动机在额定电势时的过载

能力。

(5) 同步電動機的過載能力

$$k = \frac{M_{\text{макс}}}{M_H} = \frac{P_{\text{макс}}}{P_H} = \frac{P_{\text{макс.н}}}{P_H} \cdot \frac{E}{E_H} = k_H \varepsilon \quad (9)$$

(6) 在電動機具有額定負載時，供電電網的額定電壓和額定電勢具有下列關係

$$U_H = E_H (\cos \Theta_H - \sin \Theta_H \operatorname{tg} \varphi_H) \quad (10)$$

式中

$$\operatorname{tg} \varphi_H = \frac{Q_H}{P_H}$$

選擇同步電動機最有利的額定 $\cos \varphi_H$ 要根據經濟標準^[23]。僅當同步電動機的額定功率超過某一定值時，具有超前的 $\cos \varphi_H = 0.8 \sim 0.9$ 才是適宜的。小功率同步電動機最好製成具有 $\cos \varphi_H = 1$ 。

將式(7)、(8)和(10)聯立求解，可以確定下列關係式

$$q = \frac{\sqrt{\varepsilon^2 k_H^2 - p^2} - \sqrt{k_H - 1} + \operatorname{tg} \varphi_H}{\operatorname{tg} \varphi_H} \quad (11)$$

或

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{p^2 + [(q-1) \operatorname{tg} \varphi_H + \sqrt{k_H^2 - 1}]^2}}{k_H} \quad (12)$$

式(11)在激磁按給定規律調節時可以用來計算電動機的無功功率(如果軸上之功率已經給定)和確定在各種不同負載下 $\cos \varphi$ 變化的特性。

式(12)可以用來確定電動機在給定工作方式下的電勢。

計算復激磁同步電動機的工作方式時可以利用下列關係式：

轉矩方程式

$$M = \frac{U_H E}{z} \sin(\Theta + \rho) - \frac{E^2 R}{z^2} \quad (13)$$

式中 $z = \sqrt{x^2 + R^2}$; $\rho = \arccos \frac{R}{z}$;

$R = r_1 + r_{T.T} + r_{\text{БЛН}} + r_{\text{В}}$ ——定子繞組电阻, 电流互感器电阻, 整流器电阻和接到定子繞組上的电动机激磁繞組电阻四个电阻之和。

从电动机简化矢量图得到的电势方程式具有下列形式

$$E = \sqrt{(Ix)^2 + 2IxU_{\text{H}} \sin \varphi + U_{\text{H}}^2} \quad (14)$$

$$(Ix)^2 = E^2 + U_{\text{H}}^2 - 2EU_{\text{H}} \cos \Theta \quad (15)$$

复激磁同步电动机在 $\cos \varphi = 1$ 时, 最大可能的反轉功率可以按下式确定^[12]

$$P_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{H}}^2}{4a} - b \quad (16)$$

式中 a ——和定子电流平方成正比的相对銅損;

b ——定子的相对鉄損。

式(16)适用于小功率同步电动机, 它們的过载能力基本上取决于定子的电阻。

电网中任何一部分的能量損耗和該部分电网所傳輸的总功率平方成正比, 即与下列数值成正比

$$\frac{\int_0^T (P_c + P)^2 dt + \int_0^T (Q_c - Q)^2 dt}{T} \quad (17)$$

式中, $P_c - jQ_c$ 为用户的总功率, 但其中不包括同步电动机的功率。

因为同步电动机激磁自动調节时仅无功功率变化, 所以很明显, 下列积分值愈小則电网中該部分的能量損耗也就愈小

$$\frac{\int_0^T (Q_c - Q)^2 dt}{T} \quad (18)$$

假設电动机在激磁自动調节时，如果按发热來說已經滿載且 Q_c 与時間无关，則可得出

$$\frac{\int_0^T (Q_c - Q)^2 dt}{T} = Q_c^2 + Q_n^2 - 2 \frac{Q_c}{T} \int_0^T Q dt \quad (19)$$

由式(19)可以看出，在电动机的等效无功功率給定的条件下，即当 $Q_c > Q_n$ 时，如果同步电动机輸出的无功能量增加，則电网中能量的損耗就减少。

供电电网中电压的波动与有功和无功功率的变化有密切关系。因此，只有在研究了电动机激磁調节的各种規律以后，才能对它作出定性的估計。

下面将根据电动机和供电电网所要求的工作方式研究激磁調节的各种規律。

3. 保持供电变电站母綫电压恒定的 同步电动机激磁調节規律

保持供电变电站母綫电压不变的激磁調节之所以合理是根据这样一个简单的事实，即电压与額定值的任何偏差都将引起同步电动机以及由同一变电站母綫供电的其他电能用戶工作条件(技术經濟指标)的恶化。工厂电网和供电綫路所負載的有功及无功功率是随时都在随着个别用戶負載的变化以及其他电能用戶按生产工艺的要求接通和断开負載而变化着的。因为，工业企业的电力設備一般都是通过降压变压器、电抗器和其他中間装置从电力系统供电，所以，由这些元件和綫路中电压降所引起供电变电站母綫电压的波动与有功功率和