Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 28 (1937)
Heft: 21

Artikel: Der Anlauf von Synchronmotoren
Autor: Schüler, L.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058760

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 26.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Répartition des applications domestiques. Tableau III.

Consommation annuelle												
Application	1931		1932		1933		1934		1935		1936	
	10^6 kWh	%	10^6 kWh	%	10^6 kWh	%	10^6 kWh	%	10^6 kWh	%	10^6 kWh	%
Kochherde	78,0	16,1	88,0	16,6	97,0	17,2	106,0	17,8	116,0	18,4	123,0	18,6
Heisswasserspeicher .	197,0	40,6	222,0	41,9	240,0	42,5	255,0	42,8	272,0	43,2	289,0	43,8
Therm. Kleinapparate	69,5	14,3	73,6	13,9	77,8	13,8	81,0	13,6	84,0	13,3	87,0	13,2
Kleinmotoren . . .	4,0	0,8	4,4	0,8	4,8	0,8	5,4	0,9	5,9	0,9	6,2	0,9
Lampen	137,0	28,2	142,0	26,8	145,0	25,7	148,0	24,9	152,0	24,2	155,0	23,5
Total	485,5	100,0	530,0	100,0	564,6	100,0	595,4	100,0	629,9	100,0	660,2	100,0

Recettes annuelles des entreprises												
Application	1931		1932		1933		1934		1935		1936	
	10^6 Fr.	%	10^6 Fr.	%	10^6 Fr.	%	10^6 Fr.	%	10^6 Fr.	%	10^6 Fr.	%
Cuisinières	5,60	7,2	6,10	7,6	6,55	7,9	7,10	8,4	7,70	9,0	8,04	9,3
Chauffe-eau	7,80	10,1	8,55	10,7	9,20	11,2	9,70	11,5	10,00	11,7	10,15	11,8
Pet. appareils therm.	8,41	10,9	8,84	11,1	9,35	11,4	9,68	11,5	9,85	11,5	10,00	11,6
Petits moteurs . . .	0,88	1,1	0,92	1,1	0,98	1,2	1,05	1,3	1,10	1,3	1,14	1,3
Lampes	54,60	70,7	55,50	69,5	55,90	68,3	56,60	67,3	56,90	66,5	57,00	66,0
Total	77,29	100,0	79,91	100,0	81,98	100,0	84,13	100,0	85,55	100,0	86,33	100,0

Prix moyens de l'énergie						
Application	1931	1932	1933	1934	1935	1936
	Cts./kWh	Cts./kWh	Cts./kWh	Cts./kWh	Cts./kWh	Cts./kWh
Cuisinières	7,18	6,93	6,76	6,70	6,63	6,55
Chauffe-eau	3,96	3,85	3,83	3,80	3,68	3,51
Pet. appareils therm.	12,10	12,02	12,00	11,95	11,72	11,50
Petits moteurs . . .	22,10	21,00	20,30	19,40	18,60	18,30
Lampes	39,80	39,10	38,60	38,20	37,40	36,70
Moyenne	15,92	15,10	14,51	14,12	13,59	13,09

En 1936, la consommation moyenne d'un ménage s'est élevée à 175 kWh pour l'éclairage, 7 kWh pour les petits moteurs, 98 kWh pour les petits appareils thermiques, 139 kWh pour la cuisine et 326 kWh pour la préparation d'eau chaude, soit au total 745 kWh, qui ont rapporté fr. 97.50 au distributeur. En partant des chiffres du tableau III, on peut dire qu'un ménage entièrement électrifié consomme en moyenne 200 kWh pour l'éclairage, 20 kWh pour les petits moteurs, 130 kWh pour les petites applications thermiques, 1250 kWh pour la cuisine, et 1900 kWh pour l'eau chaude, soit en tout *3500 kWh* qui, aux prix moyens de 1936 rapporteraient au distributeur fr. 240.60. De ce fait le prix moyen de l'électricité est ramené à 6,87 cts/kWh. Ces chiffres sont reportés graphiquement à la fig. 11, en pointillés pour le ménage moyen actuel et en traits pleins pour un ménage entièrement électrifié. Les abscisses figurant la consommation et les ordonnées les prix, les aires des rectangles représentent les recettes correspondantes.

Pour terminer nous tenons à exprimer nos remerciements aux entreprises qui ont contribué à la réussite de notre étude en remplissant consciencieusement les questionnaires d'enquête.

Der Anlauf von Synchronmotoren.

Von *L. Schüler*, Berlin.

621.316.717 : 621.313.323

Bei Synchronmotoren mit asynchronem Anlauf ist die Grösse der Schwungmasse, mit der der Motor in Synchronismus laufen kann, beschränkt. Es wird gezeigt, wie der zulässige Wert des Schwungmoments bei verschiedenen Arten von Motoren und unter verschiedenen Anlaufbedingungen berechnet werden kann.

Dans les moteurs synchrones à démarrage asynchrone, la grandeur de la masse tournante avec laquelle le moteur peut entrer en synchronisme est restreinte. L'auteur montre comment on peut calculer la valeur admissible du moment d'inertie de différents types de moteurs sous différentes conditions de démarrage.

Beim Anlauf normaler Betriebsmotoren spielt die zu beschleunigende Schwungmasse — von Sonderfällen abgesehen — eine untergeordnete Rolle. Dies kommt daher, dass auch grosse Schwungmassen durch kleine Antriebskräfte beschleunigt werden können, wenn sie nur lange genug wirken. Die

grosse Schwungmasse macht sich also nur durch längere Anlaufzeit geltend, was in den meisten Fällen nicht weiter stört. Anders liegt die Sache bei selbstanlaufenden Synchronmotoren; hier zerfällt der Anlaufvorgang in zwei Teile, nämlich 1. den Asynchron-Anlauf, der sich vom Stillstand bis zur asynchronen Drehzahl, also etwa 95 % der synchronen Drehzahl erstreckt, und 2. die Synchronisierung. Der erste Teil unterscheidet sich nicht vom Anlauf eines gewöhnlichen Asynchronmotors; die erreichte Drehzahl, bzw. der Schlupf hängt von den beim Asynchronmotor hierfür massgebenden Faktoren ab, also im wesentlichen vom Widerstand der zum Asynchron-Anlauf benutzten Kurzschlusswicklung und natürlich von der Belastung. Im zweiten Teil des Anlaufs wird die Drehzahl bis zum Synchronismus gesteigert; das hierfür zur Verfügung stehende Drehmoment wirkt aber nicht, wie das asynchrone Drehmoment, kontinuierlich, sondern es besteht aus kurzdauernden Kraftimpulsen wechselnder Richtung. Ein einzelner dieser Impulse muss die umlaufenden Massen von der asynchronen auf die synchrone Drehzahl beschleunigen; reicht seine Kraft und Dauer hierzu nicht aus, so kann ihm auch der folgende Impuls nicht helfen, denn dieser wirkt in umgekehrter Richtung, also verzögernd, so dass der nächstfolgende, beschleunigende, Impuls wieder vor dieselbe Aufgabe gestellt ist wie der erste und sie natürlich auch nicht erfüllen kann. Hieraus ergibt sich die ausschlaggebende Rolle der Schwungmasse für den Anlauf, bzw. das Intrittfallen des Synchronmotors. Erschwerend fällt noch ins Gewicht, dass der synchronisierende Kraftimpuls nicht nur die Schwungmasse beschleunigen, sondern gleichzeitig auch das volle vom Motor zu leistende Drehmoment übernehmen muss, da das asynchrone Drehmoment bei Synchronismus bekanntlich = 0 ist. Nur der Ueberschuss des synchronisierenden Kraftimpulses über das Lastdrehmoment steht für die Massenbeschleunigung zur Verfügung.

Es soll nun die Grösse und Dauer der synchronisierenden Kraftimpulse betrachtet werden und zwar zunächst bei einem Motor mit ausgeprägten Polen, aber *ohne* Gleichstromerregung. Die Vorstellung wird erleichtert, wenn man an einen Läufer-gespeisten Motor mit ausgeprägten Ständerpolen denkt, bei dem also im Synchronismus das vom Läufer erzeugte Drehfeld im Raum stillsteht, während der Läufer bei z. B. 4poliger Ausführung und 50 Per./s mit 1500 U/min umläuft. Durch eine in die Ständer-Polschuhe eingebettete Kurzschlusswicklung wird der Läufer in bekannter Weise zum Anlauf gebracht und möge zunächst eine asynchrone Drehzahl von 1440 U/min erreichen, so dass das Drehfeld mit 60 U/min im Raum umläuft; die Schlupffrequenz ist demnach 2 Per./s und die Zeitdauer einer Schlupfperiode = $^1/_2$ s. Man betrachte jetzt das Vorbeigleiten des Drehfeldes (Fig. 1, obere Kurve) an einem Polvorsprung des Ständers. Befindet sich der Mittelpunkt des Pols in der Stellung *a*, also in der neutralen Zone des Drehfelds, so heben sich die auf ihn ausgeübten Anziehungskräfte auf; die resultierende Kraft ist also = 0 (Fig. 1, untere Kurve). In der Stellung *b*, wo der Mittelpunkt des Pols mit dem Maximalwert des Drehfeldes zusammenfällt, ist die tangentiale Zugkraft ebenfalls = 0; zwischen den beiden Stellungen *a* und *b* liegt das Maximum der Zugkraft in Richtung des Drehfeldes, also das Maximum eines synchronisierenden Kraftimpulses. Zwischen den Stellungen *b* und *c* findet dann eine tangentiale Anziehung in entgegengesetzter Richtung statt, die den Läufer, wenn er beim ersten Kraftimpuls den Synchronismus noch nicht erreicht hat, wieder auf

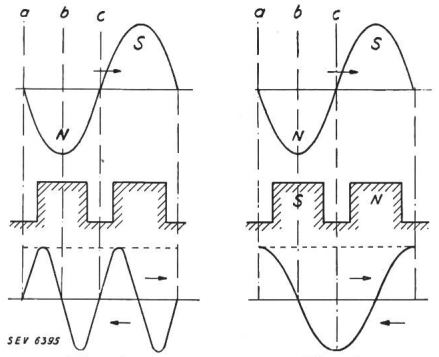

Fig. 1. Fig. 2.
Anlauf des Synchronmotors
ohne mit
Gleichstromerregung.

den Anfangswert von 1440 U/min verzögert, und so fort, wobei auf jede Schlupfperiode zwei beschleunigende und zwei verzögernde, also im ganzen vier Kraftimpulse entfallen. Hat der Motor dagegen den Synchronismus erreicht, so verwandelt sich die Zugkraft-Kurve in die gestrichelte, gerade Linie, die auf der Höhe des Maximalwerts der Kraftimpulse verläuft. Diese Linie stellt das *Kippmoment* des Synchronmotors dar.

Man kennt also jetzt den Maximalwert (= Kippmoment), und die Dauer (= $^1/_4$ Schlupfperiode) eines synchronisierenden Kraftimpulses. Dass der Verlauf annähernd sinusförmig sein muss, ist leicht einzusehen und auch durch Messung festzustellen. (Man erregt bei Stillstand des Motors die Primärwicklung mit Gleichstrom und misst das zum Drehen des Läufers nötige Drehmoment bei verschiedenen Stellungen.) Demnach ist der für die Massenbeschleunigung massgebliche arithmetische Mittelwert des Kraftimpulses = 65 % des Maximalwerts oder des Kippmoments. Wenn nun das Kippmoment etwa gleich dem 1,5fachen Nennmoment des Motors ist, so ist das mittlere synchronisierende Drehmoment praktisch gleich dem Nenndrehmoment.

Bezeichnet man jetzt die Differenz zwischen der synchronen und der asynchronen Drehzahl, also die Schlupfdrehzahl, mit n_s, so ist die Beschleunigung *b*, die einer am Durchmesser *d* angebrachten Masse *G* bei der Synchronisierung erteilt werden muss

$$b = \frac{\pi \, d \, n_s}{60}$$

Wenn diese Beschleunigung in der Zeit *t* erfolgen soll, so ist hierzu eine Kraft

$$F = \frac{G \cdot b}{9{,}81 \cdot t} = \frac{G \pi d n_s}{9{,}81 \cdot t \cdot 60}$$

erforderlich. Die Zeit t ist, wie man gesehen hat, gleich $1/4$ Schlupfperiode, und die Dauer einer Schlupfperiode wird durch die Formel $\frac{n}{f n_s}$ ausgedrückt, wo n die synchrone Drehzahl und f die Frequenz bedeutet. Es ist also

$$t = \frac{n}{4 f n_s}$$

also

$$F = \frac{G \pi d n_s \cdot 4 f n_s}{9{,}81 \cdot 60 \cdot n}$$

Da nun ferner, wie gezeigt wurde, die Kraft F, also der Mittelwert des synchronisierenden Kraftimpulses, gleich dem Nenndrehmoment des Motors ist, so führt man das Drehmoment

$$M = \frac{F \cdot d}{2}$$

oder noch besser die Motor-Nennleistung

$$P = \frac{M n}{975} = \frac{F d n}{2 \cdot 975} \text{ (in kW)}$$

ein, und erhält

$$F = \frac{P \cdot 2 \cdot 975}{d n} = \frac{G \pi d n_s^2 4 f}{9{,}81 \cdot 60 \cdot n}$$

und hieraus

$$P = \frac{G d^2 n_s^2 f}{9 \cdot 10^4}$$

Wenn der Motor nicht leer, sondern unter teilweiser Belastung anlaufen soll, so steht, wie bereits erwähnt, nur der Ueberschuss der Nennleistung P über die Anlauflast P_a für die Massenbeschleunigung zur Verfügung. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes schreibt man die Formel

$$G d^2 = \frac{P - P_a}{n_s^2 f} 9 \cdot 10^4.$$

Darin bedeutet

- Gd^2 das höchstzulässige Schwungmoment (einschliesslich Läufer) in kgm²,
- P die Nennleistung des Motors in kW,
- P_a die Belastung beim Anlauf in kW,
- f die Frequenz in Per./s,
- n_s die Schlupfdrehzahl, d. h. die Differenz der synchronen Drehzahl und der Drehzahl, die der Motor im asynchronen Lauf bei der Last P_a erreicht (in U/min).

Für die Frequenz 50/s, Anlauf mit $1/2$ Last und eine Schlupfdrehzahl von 60/min bei dieser Last ergibt sich hieraus eine höchstzulässige Schwungmasse von 0,25 kgm² pro kW Motornennleistung.

Es soll jetzt der Synchronmotor mit Gleichstromerregung betrachtet werden. Hierfür gilt Fig. 2. Befindet sich der Mittelpunkt des Ständer-S-Pols in der Stellung a, also in der neutralen Zone des Drehfeldes, so wird er vom N-Pol des Drehfelds nach rechts, also in Richtung des Drehfelds gezogen. In der Stellung b, wo der Mittelpunkt des Pols mit dem Maximalwert des Drehfeldes zusammenfällt, ist die tangentiale Zugkraft $= 0$ (labiles Gleichgewicht); in der Stellung c erreicht sie den Höchstwert in entgegengesetzter Richtung, und so fort. Man sieht also, dass jetzt nicht mehr 4, sondern nur 2 Kraftimpulse auf jede Schlupfperiode entfallen, so dass die Dauer eines Kraftimpulses unter sonst gleichen Verhältnissen bei einem Synchronmotor mit Gleichstromerregung doppelt so lang ist, als einem solchen mit unerregten Polvorsprüngen. Hiedurch erklärt sich ohne weiteres das bessere Synchronisierungsvermögen dieser Motoren. In den obigen Formeln wirkt sich dies durch Verdopplung des Zahlenfaktors aus; die Formel für das Schwungmoment lautet also für Gleichstromerregte Synchronmotoren

$$G d^2 = \frac{P - P_a}{n_s^2 f} 18 \cdot 10^4.$$

Demnach beträgt bei der Frequenz 50/s, Anlauf mit Halblast und eine Schlupfdrehzahl von 60/min bei Halblast die höchstzulässige Schwungmasse bei Gleichstrom-erregten Synchronmotoren 0,5 kgm² pro kW Nennleistung.

Die Formel gilt, wohlgemerkt, nur für Motoren mit 1,5fachem Kippmoment. Ist dies höher, so kann man P gleich der 0,67fachen Kippleistung in die Formel einsetzen.

Ein abweichendes Verhalten zeigt der vom Verfasser im Jahre 1922 angegebene selbsterregende Synchronmotor [1]), dessen Erregergleichstrom von einer besonderen Wicklung des netzgespeisten Läufers erzeugt wird; es handelt sich also im wesentlichen um einen selbsterregenden Einanker-Umformer. Solange dieser Motor noch nicht synchron läuft, ist der Erregerstrom kein Gleichstrom, sondern Wechselstrom von Schlupffrequenz. In Fig. 2 wird also der mit S bezeichnete Pol etwa in der Stellung c seine Polarität umkehren, so dass der gegen das Drehfeld gerichtete Kraftimpuls seine Richtung ändert und nun ebenfalls in beschleunigendem Sinne wirkt. Es findet also eine Addition der aufeinander folgenden Kraftimpulse und dementsprechend eine kontinuierliche Beschleunigung des Läufers bis zum Synchronismus statt. Ein solcher Motor ist demnach nicht der bei anderen Synchronmotoren auftretenden Beschränkung in bezug auf die Schwungmasse unterworfen, sondern er kann, wenn man ihm nur Zeit lässt, jede beliebige Schwungmasse in den Synchronismus bringen.

[1]) ETZ 1923, S. 4.