

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	69 (1978)
Heft:	17
Artikel:	Polumschaltbare Dreiphasenwicklungen mit 6 Klemmen : Übersicht zum Stand der Technik
Autor:	Auinger, H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-914931

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.01.2026

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

Polumschaltbare Dreiphasenwicklungen mit 6 Klemmen

Übersicht zum Stand der Technik

Von H. Auinger

621.3.045:621.313.333.2;

Die Arbeit gibt einen systematischen Überblick zum Stand der Technik bei 2stufig polumschaltbaren Dreiphasenwicklungen mit geringer Klemmenzahl, wie sie hauptsächlich in der Antriebstechnik bei kleinen und mittleren Käfigläufermotoren eingesetzt werden. Ausgehend von der Dahlander-Schaltung werden die theoretischen Grundlagen und Besonderheiten von «polamplitudenmodulierten» (PAM)- und «phasenmodulierten» Wicklungen umrissen und darauf aufbauend neuartige Umgruppierungsschaltungen behandelt, bei denen die galvanisch getrennten Mittelpunkte einer mehrfach parallel in γ geschalteten Wicklung als Anschlusspunkte für die zweite Polzahl dienen.

Aperçu systématique de l'état de la technique dans le cas d'enroulements triphasés à commutation de polarité à deux nombres de pôles, avec un nombre restreint de bornes, notamment pour moteurs à cage de faible à moyenne puissance. En partant du couplage Dahlander, les bases théoriques et les particularités d'enroulements à modulation d'amplitude de polarité et à modulation de phase sont décrites, puis des couplages de commutation d'un nouveau genre sont traités, pour lesquels les points médians séparés galvaniquement d'un enroulement en γ à bobines parallèles servent au raccordement du second nombre de pôles.

1. Einleitung

1.1 Zweck und Einsatzgebiet polumschaltbarer Wicklungen

Durch Änderung der Polpaarzahl p wird bei synchronen oder asynchronen Wechselstrommaschinen gemäss

$$n = f/p \text{ bzw. } (1 - s) f/p \quad (1)$$

eine stufenweise Einstellung der Drehzahl n bei fester Netzfrequenz f erreicht. s bedeutet dabei den bei Asynchronmotoren üblicher Bauform in der Größenordnung $s \approx 10^{-2}$ liegenden Schlupf.

Polumschaltbare Wicklungen werden hauptsächlich in der Antriebstechnik bei kleinen und mittleren Käfigläufermotoren eingesetzt. Sie sind gegenüber getrennten Wicklungen kostengünstiger herstellbar und ermöglichen eine höhere Maschinenausnutzung. Da der Aufwand für die notwendige Umschaltseinrichtung um so stärker ins Gewicht fällt, je kleiner die Maschine ist, werden einfache Schaltungen mit möglichst nicht mehr als 6 Klemmen gewünscht. Gleichermaßen gilt auch für polumschaltbare Schleifringläufer, wo jedes Anschlussende einen eigenen Schleifring erfordert.

Ein weiteres Einsatzgebiet polumschaltbarer Wicklungen sind Synchronmaschinen für Wasserkraftanlagen. Mit Rücksicht auf den hydraulischen Wirkungsgrad können z.B. bei jahreszeitlich stark schwankender Gefällehöhe zwei verschiedene Drehzahlen vorgesehen werden. Aus gleichem Grund sind bei Pumpspeicherwerken unterschiedliche Drehzahlen im Pumpen- und Turbinenbetrieb vorteilhaft.

1.2 Aufgabenstellung

Sequenz hat in umfassender Weise den gesamten technischen Stand der Polumschaltung bis etwa 1950 zusammengestellt [1]¹⁾.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich im wesentlichen auf 2stufig umschaltbare Dreiphasenwicklungen mit 6 Klemmen. Anhand der prinzipiellen Schaltungsmöglichkeiten sollen dabei vor allem jene Grundgedanken und Ansätze zur «Theorie» polumschaltbarer Wicklungen aufgezeigt werden, die innerhalb der letzten 25 Jahre entstanden sind und diesem Teilgebiet neue Impulse gegeben haben. Abschliessend wird eine im Nürnberger Maschinen- und Apparatewerk der Siemens AG entwickelte neuartige Schaltung etwas detaillierter behandelt.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Polumschaltung durch Stromrichtungsumkehr

2.1 Dahlander-Wicklung

Am häufigsten angewandt wird die seit der Jahrhundertwende bekannte Dahlander-Schaltung für ein Polzahlverhältnis $p_2 : p_1 = 2$. Sie beruht auf dem Prinzip der Stromrichtungsumkehr (Fig. 1). Jeder Strang einer 4/2polig umschaltbaren Wicklung besteht z.B. aus 2 gegenüberliegenden Spulengruppen, deren Schrittweite der kleineren Polteilung entspricht. Bei gleichsinniger Stromdurchflutung ergibt sich die höhere und bei gegensinniger Durchflutung die niedrigere Polzahl. Zur Umschaltung ist eine Mittelanzapfung 1U vorgesehen.

2.2 Polamplitudenmodulation

Auf dieser Schalttechnik aufbauend haben Rawcliffe und Mitarbeiter Ende der 50er bis Mitte der 60er Jahre die Theorie der sog. Polamplitudenmodulation entwickelt [2; 3; 4], welche die Dahlander-Wicklung als Sonderfall enthält und mit deren Hilfe sich Wicklungen für nahezu beliebige Polzahlkombinationen entwerfen lassen.

Der Name Polamplitudenmodulation – abgekürzt PAM – leitet sich daraus her, dass die Stromrichtungsumkehr mathematisch als räumliche Modulation beschrieben werden kann. Gemäss

$$\sin p_1 x \cdot \sin p_M x = \frac{1}{2} [\cos (p_1 - p_M)x + \cos (p_1 + p_M)x] \quad (2)$$

erhält man aus einer ursprünglichen Wicklungsverteilung entsprechend $\sin p_1 x$ für die Erstpolpaarzahl p_1 durch Modulation mit $\sin p_M x$ Zweitpolpaarzahlen mit der Summe $(p_1 + p_M)$ und Differenz $(p_1 - p_M)$ aus beiden.

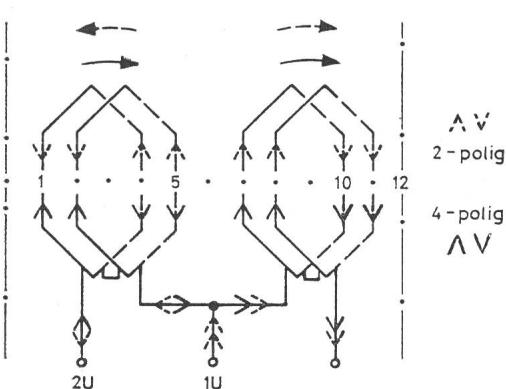


Fig. 1 Dahlander-Wicklung $p_2 : p_1 = 2$ mit Stromrichtungsumkehr

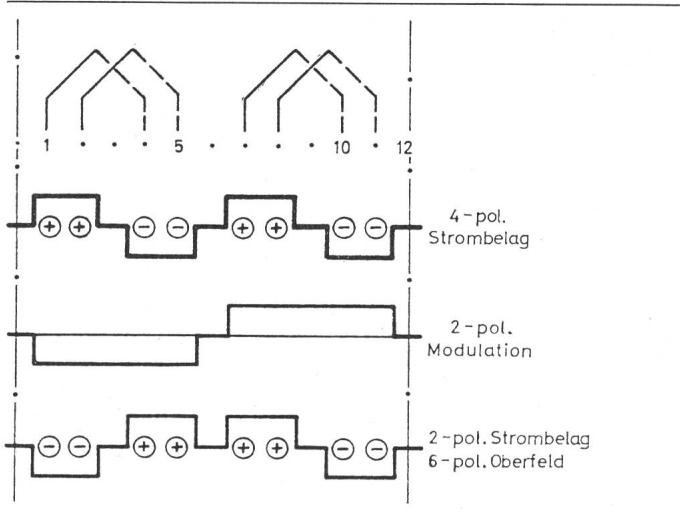


Fig. 2 Erläuterung des PAM-Prinzips für einen Strang der Dahlander-Wicklung

Durch geeignete räumliche Wicklungsverteilung erreicht man, dass im Zusammenwirken der 3 Stränge zum resultierenden Drehfeld entweder die Summen- oder die Differenzpolzahl zumindest weitgehend unterdrückt wird. Je nachdem, ob man die angestrebte Zweitpolpaarzahl p_2 mit einer Modulationswelle

$$p_M = p_1 + p_2 \quad \text{oder} \quad p_M = p_1 - p_2 \quad (3a \text{ oder } 3b)$$

erhält, unterscheidet man zwischen einer Summen- (3a) oder Differenzmodulation (3b). Bevorzugt wird die Summenmodulation angewandt, da sie im allgemeinen eine gleichmässigere Feldform ergibt. Äusseres Kennzeichen: Bei der Umschaltung kehrt sich die Phasenfolge um, so dass man – wie bei der Dahlander-Schaltung – zur Beibehaltung des Drehsinns zwei Stränge vertauschen muss. Bei einer Differenzmodulation (3b) bleibt hingegen die Phasenfolge unverändert.

In Fig. 2 ist am Beispiel einer 4/2poligen Dahlander-Wicklung die PAM-Theorie verdeutlicht. Die 4polige Wicklungsverteilung eines Stranges ist durch die Strombelagskurve symbolisiert. Die Stromrichtungsumkehr bedeutet eine Multiplikation mit einer 2poligen Modulationswelle. Man erhält eine Strombelagsverteilung mit der Differenzpolzahl $2(p_1 - p_M) = 2$ und ein stark ausgeprägtes Oberfeld mit der Summenpolzahl $2(p_1 + p_M) = 6$. Letzteres tritt jedoch nur bei einsträngiger Speisung auf. Im Zusammenwirken aller 3 Stränge wird es aufgehoben.

Zweckmässigerweise betrachtet man daher bei Mehrphasenwicklungen nicht den Strombelag eines Einzelstranges, sondern die resultierende Durchflutung der gesamten Wicklung. Fig. 3 zeigt die Zonenpläne für beide Polzahlen, wobei die Spulenseiten der 3 Stränge mit verschiedenen Symbolen unterschieden sind. Die jeweilige Durchflutungsrichtung ist mit + und - angegeben. Bei der Polumschaltung wird die Stromrichtung der in den abgegrenzten Bereichen liegenden Spulenseiten umgekehrt, was nach der PAM-Theorie eine $2p_M = 2 + 4 = 6$ polige Summenmodulation der gesamten Wicklung bedeutet.

Ein recht anschauliches Hilfsmittel zur Beurteilung des resultierenden Durchflutungsverlaufes von mehrphasigen Wicklungen sind die aus den vektoriell aneinandergefügten Nutdurchflutungen gebildeten Görgespolygone [5]. Ihre Abweichungen von der idealen Kreisform lassen unmittelbar Art

und Grösse der vorhandenen Feldoberwellen erkennen. Diese Polygone stellen ein Polardiagramm der üblichen treppenförmigen Felderregerkurven dar, die man für beliebige Zeitpunkte durch Projektion der einzelnen Polygonpunkte auf ein entsprechendes Nutungsraster ermitteln kann.

In der Grundgleichung (2) der Polamplitudenmodulation können p_1 und p_M beliebige ganze Zahlen sein, so dass auf diese Weise verschiedenste Polzahlkombinationen ausführbar sind. Die Dahlander-Wicklung entspricht einem markanten Sonderfall, bei dem sich die Spulenanordnung von Pol zu Pol in gleicher Weise wiederholt, so dass ein Höchstmass an Wicklungssymmetrie erreicht wird.

Im allgemeinen ist dies jedoch bei einer PAM-Wicklung nicht der Fall, und es ergeben sich – ähnlich wie bei Bruchlochwicklungen – subharmonische Oberfelder, also sog. Unterwellen. Auch müssen die 3 Stränge teilweise unterschiedlich zusammengesetzt werden, und zwar immer dann, wenn eine der Polzahlen ein Vielfaches der Phasenzahl, also $2p = 6, 12$ usw. ist. Man spricht in diesem Fall auch von einer «asymmetrischen Polamplitudenmodulation» [3].

Als typisches Beispiel zeigt Fig. 4a eine 4/6polig umschaltbare PAM-Wicklung für 36 Nuten nach [4, Fig. 11]. Die Ziffern 1...36 beziehen sich auf die Nutnummern, in denen die Oberschichtspulenseiten liegen. Unmittelbar benachbarte Spulen desselben Stranges sind zu Spulengruppen zusammengefasst. Die charakteristische Besonderheit wird aus diesem Schaltbild bereits deutlich: Die Nutenzahl je Pol und Strang beträgt in der 6poligen Stufe $q = 2$. Üblicherweise würde daher jede Stranghälfte aus jeweils drei, regelmässig am Umfang verteilten Doppelspulen zusammengesetzt sein. Hier sind hingegen die Stränge unterschiedlich gruppiert; nämlich mit $1+4+1$ Spulen beim ersten und $4+2$ bzw. $2+4$ Spulen bei den beiden anderen Strängen.

In den zugehörigen Zonenplänen für beide Polzahlen (Fig. 4b) sind die abgegrenzten Bereiche mit den von der Stromrichtungsumkehr betroffenen Spulenseiten, gemäss dem

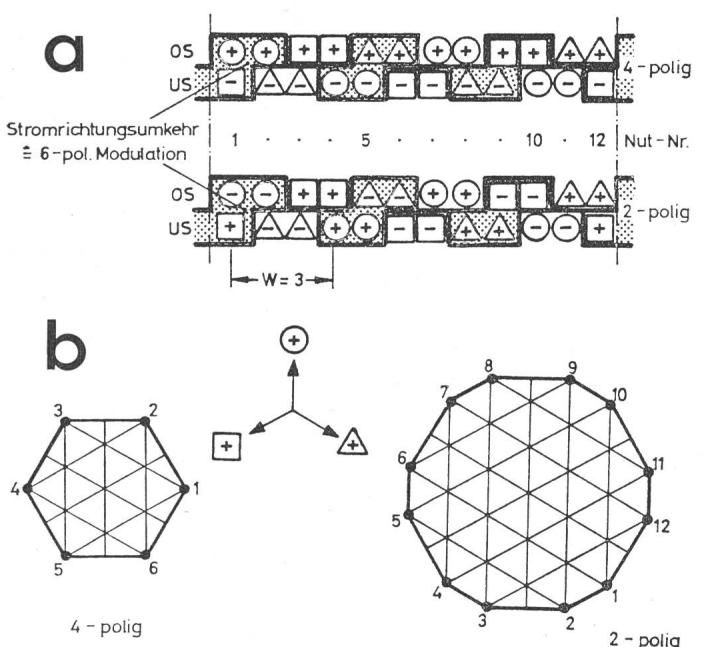


Fig. 3 4/2polige Dahlander-Wicklung

a Zonenpläne
b Görgespolygone

PAM-Prinzip als $2(p_1 + p_2) = (4 + 6) = 10$ polige Summenmodulationswelle zu interpretieren.

Aus den stark von der Kreisform abweichenden Görges-Polygonen (Fig. 4c) ist die Feldüberwelligkeit einer solchen Wicklung erkennbar. Die fehlende Polarsymmetrie bei $2p_1 = 4$ weist auf geradzahlige Harmonische hin. Der sich erst nach 3 Umläufen schliessende Polygonzug bei $2p_2 = 6$ zeigt eine ausgeprägte 2polige Unterwelle an. Keines der Polygone ist 3achsig symmetrisch; ein Zeichen dafür, dass die 3 Stränge, zumindest hinsichtlich des Oberwellengehaltes, nicht symmetriert sind.

Verschiedentlich wurden zwar schon vor Bekanntwerden der PAM-Theorie, analog zur Dahlander-Wicklung, auch andere Polzahlverhältnisse mit Stromrichtungsumkehrschaltungen ausgeführt [1; 6]. Rawcliffe und Mitarbeitern blieb es jedoch vorbehalten, als erste die universellen Möglichkeiten dieser Schaltung erkannt und hierzu die umfassenden theoretischen Grundlagen der Polamplitudenmodulation geschaffen zu haben.

3. Polumschaltung durch Umgruppieren von Wicklungszweigen

3.1 Prinzip

Eine grundsätzlich andere Möglichkeit zur Polumschaltung besteht darin, dass man die Zugehörigkeit der Spulen zu den Strängen verändert – also eine *Umgruppierung* vornimmt (Fig. 5a). Die gesamte Wicklung ist z. B. in 3 Blöcke unterteilt.

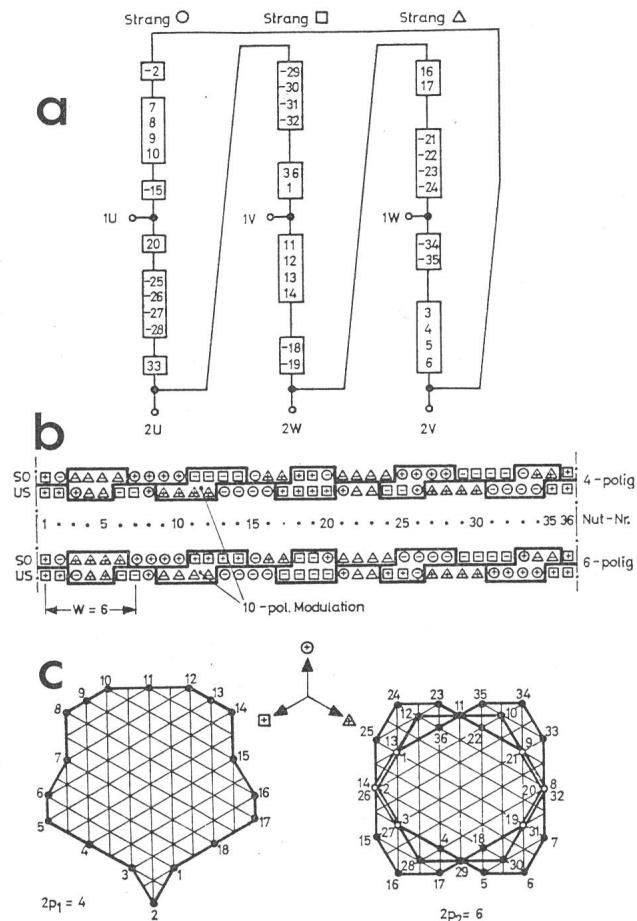


Fig. 4 4/6polige PAM-Wicklung nach Rawcliffe

- a) Schaltungsprinzip
- b) Zonenpläne
- c) Görges-Polygone

Jeder Block umfasst dabei die innerhalb eines Umfangsdrittels liegenden Spulen einer an sich üblich verteilten Wicklung der Grundpolzahl von beispielsweise $2p_0 = 6$, die sich bei gleichsinniger Hintereinanderschaltung der 3 Blöcke ergibt. Durch rechts- oder linksgängiges Umgruppieren können verringerte oder erhöhte Polzahlen $2p_1 = 4$ oder $2p_2 = 8$ erreicht werden. Diese Änderung der Polzahl wird aus dem Zonenplan (Fig. 5b) verständlich. Je nach Umgruppierungsfolge gehören das eine Mal Zone V des 1. und Zone W des 2. Blockes zu einem Strang. Das andere Mal hingegen Zone V des 1. und Zone U des 2. Blockes. Die Zonenabstände und damit die Polteilungen werden also von ursprünglich τ_0 auf τ_1 vergrössert oder auf τ_2 verringert.

Für solche Schaltungen braucht man jedoch sehr viele Anschlussklemmen. Bei 3 Wicklungsblöcken sind für eine 3stufige Umschaltung mindestens 15 und für eine 2stufige Umschaltung noch 12 Schaltenden nötig. Solche Wicklungen lassen sich für beide Polzahlen voll symmetrisch anfertigen; sie werden z. B. bei polumschaltbaren Wasserkraftgeneratoren verwendet [1].

3.2 Phasenmodulation und Phase Shift Modification

Schaltungen dieser Art wurden Anfang der 60er Jahre an der Universität Manchester systematisch untersucht [7; 8; 9]. Dabei sind z. T. auch sehr komplizierte Wicklungsanordnungen mit überlappenden Wicklungsblöcken vorgeschlagen worden, bei denen sich die Spulenwindungszahlen von Nut zu Nut ändern. Dieses Umschaltprinzip wurde ursprünglich als «Pha-

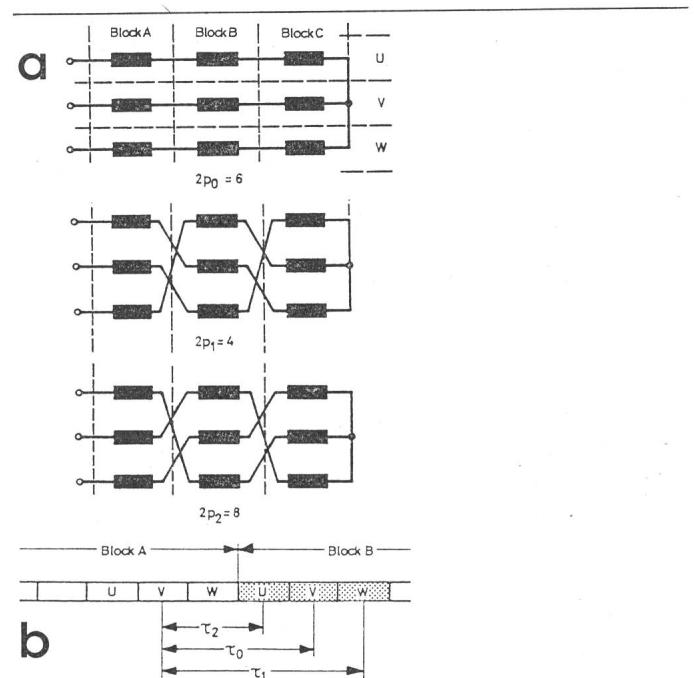


Fig. 5 Polumschaltung durch Umgruppieren von Wicklungszweigen (Phasenmodulation)
a) 3fach-Polumschaltung
b) Zur Änderung der Polteilung

senmischverfahren» und später – wohl in Anlehnung an die inzwischen bekanntgewordene Polamplitudenmodulation – als «Phasenmodulation» bezeichnet.

Charakteristisch ist, wie erwähnt, die Unterteilung in mehrere längs des Umfanges aufeinanderfolgende Wicklungsblöcke, deren Zweige beim Umschalten eine von Block zu

Schaltungsmöglichkeiten mit 6 Klemmen

Tabelle I

Anzahl und innere Schaltung der Wicklungszweige	Äussere Schaltung für p_2/p_1	Umschaltprinzip	Hilfsmittel neben einem 3poligen Umschalter
6 Zweige		Υ/Υ^2	Richtungs-umkehr Mp-Brücke (2U - 2V = 2W) für Υ^2
		Δ/Υ^2	
		Δ/Δ^2	Teilweise Umgruppierung 3 Schaltbrücken (1U - 2V) (1V - 2U) (1W - 2U) für Δ^2
9 Zweige		Δ/Δ	
		Υ^3/Υ^3	Vollständige Umgruppierung Keine

Niedrige Polzahl p_1 : Anschluss an 1 U, 1 V, 1 W

Hohe Polzahl p_2 : Anschluss an 2 U, 2 V, 2 W

Hochzahlen kennzeichnen die Mehrfachsysteme

Block gleichmässig fortschreitende Phasendrehung erfahren. Bei Dreiphasenwicklungen sind Verschiebungen um Vielfache des halben Phasenwinkels, also $60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$... möglich. Dementsprechend lassen sich solche Wicklungen mit 6, 3 oder 2 Blöcken ausführen, und bei entsprechender Klemmenanzahl werden 5-, 3- oder 2stufige Polumschaltungen möglich.

Führt man eine 2stufige Umschaltung z. B. mit nur 2 Blöcken aus, so beträgt die Phasendifferenz vor und nach dem Umschalten 180° . Die Phasenmodulation ist dann gleichbedeutend mit einer Stromrichtungsumkehr, und gegenüber einer PAM-Wicklung bestehen keine Unterschiede mehr. Tatsächlich wurden auch voneinander unabhängig identische Wicklungsanordnungen vorgeschlagen, die einmal mittels der PAM-Theorie und zum anderen als Sonderfälle von phasenmodulierten Wicklungen gefunden wurden [z. B. 4, Fig. 13 sowie 9, Fig. 8].

Ähnliches trifft auch für die an der Universität Madras entwickelte «Phase Shift Modification» zu [10; 11], eine Entwurfsmethode, bei der die Wicklungsaufteilung anhand tabellarisch schematisierter Darstellungen der Nutensterne gefunden wird. Auch derart gefundene Wicklungen lassen sich in die Wicklungstheorie der Polamplitudenmodulation oder der allgemeineren Phasenmodulation einordnen [6].

Mit Hilfe dieser Theorien und Methoden können 2stufig umschaltbare Dreiphasenwicklungen für nahezu beliebige Polzahlverhältnisse entworfen werden. Das äussere Schaltbild ist dabei immer das gleiche (Tab. I, oben). Bei nur 6 Klemmen erfolgt eine Υ/Υ^2 - oder Δ/Υ^2 -Umschaltung mit Stromrichtungsumkehr in jeder Stranghälfte. Für die Υ^2 -Stufe muss dabei eine gesonderte Mittelpunktsbrücke gebildet werden.

3.3 Andere Umgruppierungsschaltungen

Andere Möglichkeiten mit ebenfalls nur 6 Klemmen sind im unteren Teil von Tab. I dargestellt. Die teilweise Umgruppierung in Δ/Δ -Schaltung erhält man ausgehend von einer üblichen Δ/Υ^2 -Umschaltung durch Weglassen der Sternpunktsbrücke [12, Bild 206]. In der ersten Stufe werden die

mittleren drei und in der zweiten Stufe die oberen drei Anschlussklemmen eingespeist. Nach dem Umschalten verbleibt eine Hälfte der insgesamt 6 Wicklungszweige beim gleichen Strang, die andere Hälfte kommt jeweils zum Nachbarstrang. Anstelle einer symmetrischen Stromrichtungsumkehr wird eine Phasendrehung um 120° vorgenommen.

Ebenso verhält es sich bei der Δ/Δ^2 -Umschaltung, die drei zusätzliche Schaltbrücken erfordert. Schaltungen dieser Art haben jedoch wegen einer eher ungünstigen Feldform keine praktische Bedeutung gefunden [1, Abb. 79...84].

Eine sehr interessante, aber bisher kaum benutzte Schaltung mit ebenfalls nur 6 Klemmen ist im unteren Bildteil von Tab. I gezeigt. Eine 3fach parallel in Υ geschaltete Wicklung wird mit drei galvanisch getrennten Mittelpunkten ausgeführt, die als Anschlußstellen für die zweite Polzahl dienen. Die Υ^3 -Schaltung der ersten Stufe wird gewissermassen «umgestülpt» in eine zweite Υ^3 -Schaltung für die andere Polzahl. Wie man sieht, liegen von links gezählt einmal die Zweige 1, 4, 7 (Einspeisung bei 1 U) und das andere Mal die Zweige 1, 2, 3 (Einspeisung bei 2 U) parallel, so dass sich eine vollständige Umgruppierung der Wicklungszweige ergibt. Diese Schaltung ist bestechend einfach. Sie benötigt lediglich einen 3poligen Umschalter und keine gesonderte Mittelpunktsverbindung, wie die Dahlander- und PAM-Wicklung. Dieser Schaltungsvorschlag wurde bereits 1916 von Rüdenberg gemacht. Die praktische Anwendung scheiterte daran, dass sich eine Wicklung nicht ohne weiteres in 9 Zweige unterteilen lässt, von denen bei jeder Polzahl drei gleichphasig sind. Bekanntlich sind gleichphasige Parallelzweige nur in solcher Zahl ausführbar, wie es ganzzahlige Teiler der Polzahl gibt. Drei parallele Zweige sind also regulär nur bei 6, 12, 18...-poligen Wicklungen möglich.

4. Abgewandelte Schaltungen mit Nullzweigen

Erst in allerjüngster Zeit wurde diese Umgruppierungsschaltung wieder aufgegriffen. Voneinander unabhängig sind im Laufe der letzten Jahre verschiedene Vorschläge [13; 14; 15] bekanntgeworden, die diese Grundschaltung weiterentwickeln.

Die genannte Problematik bei der Aufteilung in jeweils drei parallele Wicklungszweige lässt sich wie folgt umgehen [15]: Man greift gemäss

$$a_{\max} = 2p_1 = G + N \quad (4a)$$

von den maximal möglichen $2p_1$ Parallelzweigen eine durch drei teilbare Zahl

$$G = 3k \quad (4b)$$

von Wicklungszweigen heraus und fügt diese zu einer in Υ^3/Υ^3 geschalteten Grundwicklung zusammen. Die restlichen N Wicklungszweige kann man gemäss Fig. 6 parallel oder in Reihe dazu anschliessen und als sog. Nullzweige ausbilden, die nur bei der ersten Polzahlstufe wirksam sind. Ihre räumliche Anordnung wird so gewählt, dass sich bei der zweiten Polzahl die induzierten Spulenspannungen zu null ergänzen; deshalb auch die Bezeichnung Nullzweige.

In dieser Weise lassen sich beliebige, nicht ganzzahlige Polzahlverhältnisse ausführen, für die eine der Polzahlen ein Vielfaches der Phasenzahl ist, also

$$p_1/p_2 = (3m \pm 1)/3N \quad (5)$$

mit m und n als ganzen positiven Zahlen, z.B. $4/6$ -, $8/6$ -, ..., $8/12$ -, $10/12$ -, $14/12$ - ...polige Wicklungen.

In Fig. 6 ist neben der Schaltung einer solchen Wicklung auch die Phasenlage der einzelnen Wicklungszweige bei beiden Polzahlen angegeben. Charakteristisch sind die Nullzweige 10, 11 und 12, die nur bei der ersten Polzahl (Anschluss an $1U$, $1V$, $1W$) einen zu den drei parallelen Zweigen der Grundwicklung gleichwertigen 4. Wicklungszweig bilden. Bei der durch 3 teilbaren Zweitpolzahl sind sie inaktiv. Diese Nullzweige können entweder als 4. Sternzweig für p_1 parallel zur Grundwicklung oder in Reihe dazu angeschlossen werden. Bei Reihenschaltung fließt in ihnen der gesamte Strangstrom. Sie sind daher gegenüber den Grundwicklungszweigen mit 3fachem Querschnitt und dementsprechend auf $1/3$ verringerten Windungszahlen auszuführen. Welche Schaltung zweckmässiger ist, hängt vom Polzahlverhältnis ab. Durch Reihenschaltung wird die wirkliche Windungszahl bei p_1 erhöht; sie empfiehlt sich also dann, wenn p_1 grösser als p_2 ist.

Ähnliche nur in einer Polzahlstufe wirksame Nullzweige sind auch bei Stromrichtungsumkehrschaltungen möglich. Wie Fig. 7 zeigt, kann man jeden Strang durch zusätzliche, parallel für p_2 oder in Reihe für p_1 angeschlossene Wicklungsteile ergänzen, ohne dass sich dadurch die Klemmenzahl erhöht. Solche Wicklungszweige werden z.B. aus einer gesonderten Zusatzwicklung oder aus einzelnen Spulen der Hauptwicklung gebildet, die mit angepasster Windungszahl ausgeführt sind. Bei Stromrichtungsumkehrschaltungen können hierdurch sowohl die effektiven Windungszahlen als auch die Form der Felderregerkurve günstig beeinflusst werden, so dass ein zusätzlicher Freiheitsgrad bei der Wicklungsbemessung geschaffen wird.

Bei Umgruppierungsschaltungen in γ^3/γ^3 sind hingegen solche, nur bei p_1 wirksame Nullzweige unbedingt notwendig, um diese einfache Schaltung praktisch verwendbar zu machen und eine für beide Polzahlen vollständige Wicklungssymmetrie zu erzielen.

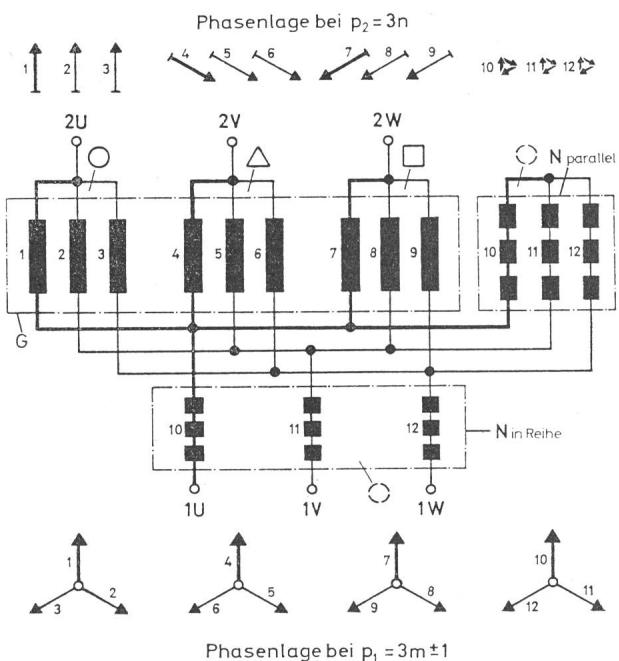


Fig. 6 Neuartige Umgruppierungsschaltung

G Grundwicklung in γ^3/γ^3
N Nullzweige

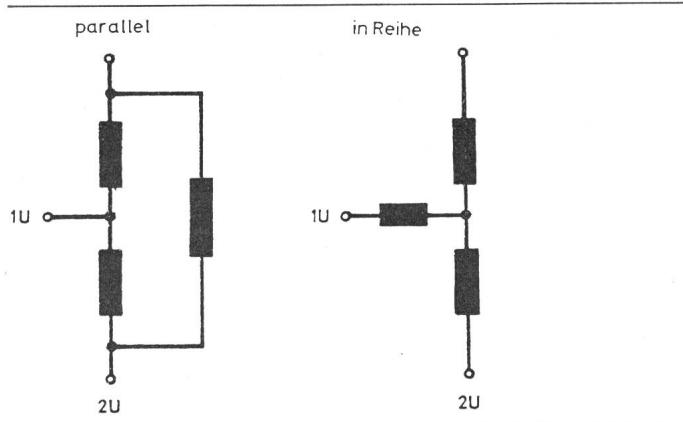


Fig. 7 Nullzweige bei Stromrichtungsumkehr

5. Besonderheiten der neuartigen Umgruppierungsschaltung

Wie geht man nun beim praktischen Entwurf einer solchen Wicklung vor? Betrachtet werde als prinzipielles Beispiel eine $4/6$ polige Umschaltung [16]. In Fig. 8a sind links die zu einem Strang gehörenden, $\pi/3$ breiten Wicklungszonen einer üblichen 4 poligen Drehstromwicklung hinsichtlich ihrer Phasenlage im Nutenstern schematisch angedeutet. Räumlich liegen diese Wicklungszonen 1...4 jeweils um eine Polteilung voneinander entfernt, gleichmässig am Maschinenumfang verteilt. Die Durchflutungsrichtung kehrt sich von Pol zu Pol um, was durch die zum Zentrum hin bzw. entgegengesetzt gerichteten Pfeilspitzen bei den Zonenachsen angedeutet ist.

Wird die Polzahl auf $2p_2 = 6$ geändert (Fig. 8a, rechts), dann vergrössern sich alle Winkel im Nutenstern gemäss dem Polzahlverhältnis $6:4$ auf das 1,5fache. Ursprünglich im Abstand π aufeinanderfolgende Zonenachsen schliessen dann einen Winkel von $3\pi/2$ ein, und die Zonenbreiten werden von $\pi/3$ auf $\pi/2$ aufgespreizt. Insgesamt füllen bei $2p_2 = 6$ die Sektoren eines 4 poligen Wicklungsstranges die gesamte Peripherie des Nutensternes gleichmässig aus. Alle Wicklungsspulen werden verschiedenphasig und nehmen sämtliche möglichen Phasenlagen ein.

Üblicherweise bilden die in den einzelnen Wicklungszonen 1...4 liegenden Spulen zusammenhängende Spulengruppen. Im Gegensatz dazu werden hier die Spulen unabhängig von ihrer räumlichen Lage so in drei Grund- und einen Nullwicklungszweig aufgeteilt, dass sich im 6 poligen Nutenstern eine 3achsige symmetrische Wicklungskonfiguration gemäss Fig. 8b ergibt.

Die in Zone 1 liegenden Spulenseiten werden z.B. dem ersten Zweig zugeordnet. Der zweite Zweig besteht zu $2/3$ aus Spulen der Zone 2 und zu $1/3$ aus Zone 3. Analog ist der dritte Zweig im Verhältnis $1:2$ aus Spulen der Zonen 3 und 4 zusammengesetzt. Der restliche Nullzweig enthält zu jeweils einem Drittel Spulen der Zonen 2, 3 und 4. Er bildet im 4 poligen Betrieb einen gleichwertigen Parallelzweig. 6 polig sind hingegen diese Spulen (weisse Sektoren im rechten Bild) um 120° phasenverschoben, so dass sich die induzierten Spannungen aufheben und der Nullzweig wirkungslos bleibt.

In gleicher Weise werden die beiden anderen jeweils um $1/3$ des Umfanges gegeneinander versetzt liegenden Wicklungsstränge V und W aufgebaut. Anhand der Wicklungssachsen (Fig. 8c) ist zu erkennen, dass sich die Phasenwinkel $4\pi/3$ und $8\pi/3$ im 6 poligen Betrieb auf 2π bzw. 4π vergrössern und somit die 3 Stränge gleichphasig induziert werden.

Wegen der bei $p_2 = 3n$ 3zonigen Wicklungskonfiguration wählt man die Spulenweite am zweckmässigsten mit $W = \tau_2$, d.h. Durchmesserschritt für die durch drei teilbare Polzahl. Man erhält dann eine für beide Polzahlstufen voll symmetrische Wicklungsverteilung, die sich von Pol zu Pol in gleicher Weise wiederholt (Fig. 8b, rechts).

Eine wahlweise Parallel- oder Reihenschaltung der Nullzweige hat auf die Feldsymmetrie keinen Einfluss. Hingegen können damit die effektiven Strangwindungszahlen bei festgehaltener Spulenweite verändert werden. Ohne unterschiedliche Nullzweigspulen zu benötigen, ist gleiches auch durch strangverschachtelte Wicklungsanordnungen möglich [15; 16]. Hierbei sind die jeweils gleichsinnig stromdurchflossenen Spulenseiten je Pol und Strang nicht unmittelbar nebeneinander angeordnet. Eine Strangverschachtelung ist bei beiden Polzahlstufen ausführbar und ermöglicht, vor allem bei höheren Nutenzahlen, eine sehr feinstufig anpassbare Wicklungs-bemessung.

6. Praktische Realisierung und Einsatz der neuen Wicklung

6.1 Beispiel

Fig. 9 zeigt als konkretes Beispiel eine solche 4/6polig umschaltbare Wicklung für 36 Nuten, die, wie die PAM-Wicklung gemäss Fig. 4, aus durchwegs gleichen Spulen mit Schrittweite $W = 6$ Nutteilungen besteht. Für 4poligen Betrieb werden die

unteren 3 Klemmen eingespeist. Die Wicklung ist in 12 Zweige unterteilt und in γ^4 mit 4 galvanisch getrennten Mittelpunkten geschaltet. Drei davon sind herausgeführt und bilden die Anschlussenden für die 6polige Stufe. Die rechts eingezeichneten Nullzweige sind dann wirkungslos.

Die Symmetrie dieser Wicklung wird aus den Zonenplänen und den völlig regulären Görgespolygonen deutlich. Die «Einkerbungen» im 4poligen Polygon röhren davon her, dass die Wicklung strangverschachtelt ist. Eine unverschachtelte Wicklungsanordnung ergäbe das umschriebene Sechseck. Wegen des höheren 4poligen Wickelfaktors wäre allerdings eine solche Ausführung für den praktischen Einsatz bei Motoren mit in beiden Stufen konstantem Moment weniger gut geeignet.

6.2 Vergleich mit PAM-Wicklungen

Die neue Schaltung wurde an mehreren 4/6poligen Versuchsmaschinen erprobt [15]. Sie erwies sich als vorteilhafte Alternative zur PAM-Wicklung. Die Wicklungsteilausnutzung in der 6poligen Stufe hat keinen nachteiligen Einfluss auf die Erwärmung.

Ein grundsätzlicher Vorteil liegt in der vereinfachten Umschaltung ohne Sternpunktsschütz. Wie im Fall getrennter Wicklungen kommt man mit einem einfachen 3poligen Umschalter aus.

Wegen der insgesamt geringeren Feldoberwelligkeit sind die Zusatzverluste niedriger (vgl. Görgespolygone Fig. 4c und

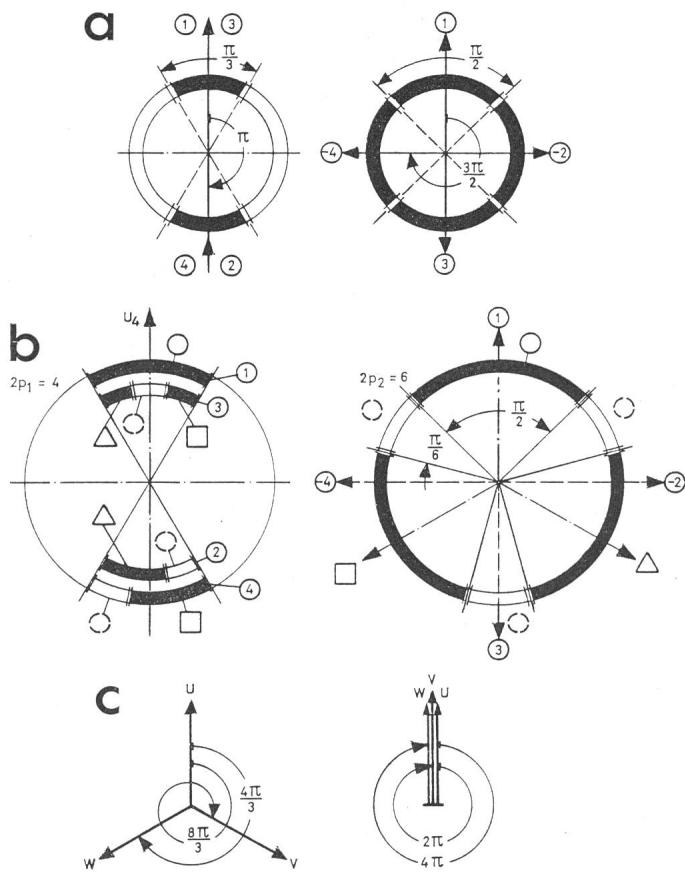


Fig. 8 4/6polige Umschaltung

- a Phasenlage der Wicklungszweige
- b Aufteilung der Wicklungszweige
- c Strangachsen

jeweils links für $2p_1 = 4$ und
rechts für $2p_2 = 6$

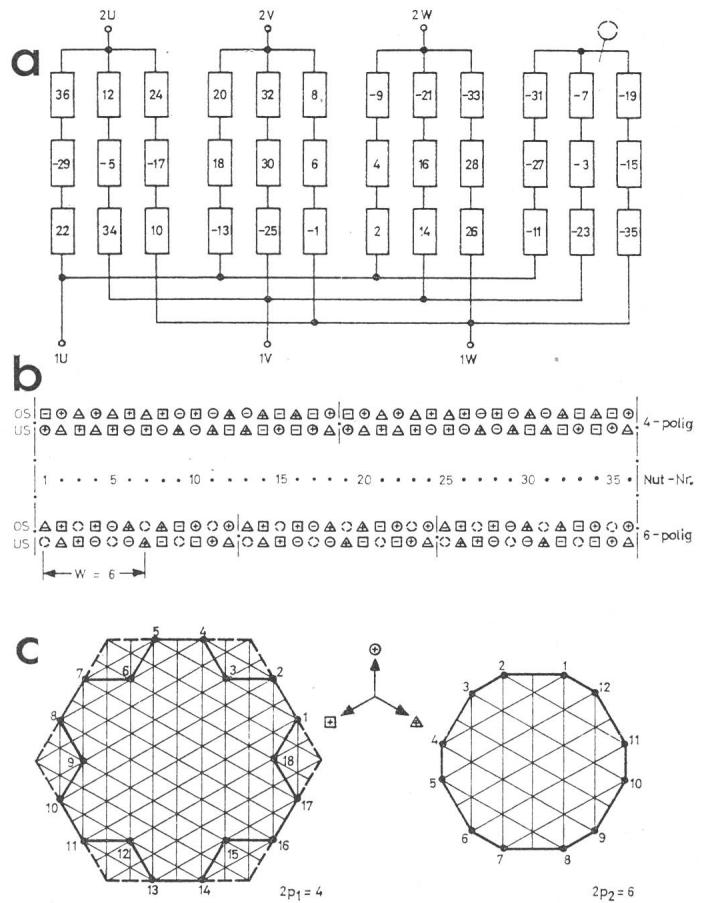


Fig. 9 Neuartige 4/6polige Wicklung

- a Schaltbild
- b Zonenpläne
- c Görgespolygone

9c). Geradzahlige und subharmonische Oberfelder, welche Ursache für verschiedene Parasitäreffekte, wie magnetisch angeregte Geräusche und Schwingungen sowie Wellenspannungen sein können, treten bei der neuen Schaltung nicht mehr auf.

Weiters sind die grösseren Freizügigkeiten bei der Wicklungsbemessung zu nennen. Durch Strangverschachtelung und infolge der Mehrfachparallelschaltung können die effektiven Strangwindungszahlen ohne Beeinträchtigung der Symmetrie sehr feinstufig angepasst werden. Diese Vorteile sind insbesondere für Maschinen höherer Leistung bedeutsam.

6.3 Anwendung

Aufgrund dieser günstigen Eigenschaften wird die 4/6polige Wicklungsstufe der Zuckerzentrifugenmotoren, Typenreihe 1SH5 von *Siemens*, seit 1½ Jahren nur noch in der neuen Schaltung ausgeführt. Mit dieser Wicklung wurden inzwischen ca. 50 Maschinen ausgeliefert.

Die neue Schaltung kann auch bei 4/6- und 8/6polig umschaltbaren Käfigläufermotoren eingesetzt werden, die für Leistungen bis rund 100 kW von den eintourigen Normmotoren abgeleitet sind. Solche Motoren werden bis etwa 30 kW sowohl mit getrennten Wicklungen als auch in PAM-Ausführung hergestellt. Dariüber werden sie bisher nur mit getrennten Wicklungen ausgeführt. Hier sind alternativ dazu in Zukunft auch umschaltbare Wicklungen möglich, wobei ohne Mehraufwand eine um fast einen Typensprung höhere Leistung erreicht wird.

Literatur

- [1] *H. Sequenz*: Die Wicklungen elektrischer Maschinen. Dritter Band: Wechselstrom-Sonderwicklungen. Wien, Springer-Verlag, 1954.
- [2] *G.H. Rawcliffe, R.F. Burbidge and W. Fong*: Induction-motor speed-changing by pole-amplitude modulation. Proc. IEE 105 A(1958)22, p. 411...419.
- [3] *G.H. Rawcliffe and W. Fong*: Close-ratio two-speed single-winding induction motors. Proc. IEE 110(1963)5, p. 916...934.
- [4] *G.H. Rawcliffe and W. Fong*: "Sum" and "difference" winding modulation with special reference to the design of 4/6-pole p.a.m. windings. Proc. IEE 117(1970)9, p. 1782...1792.
- [5] *F. Heller und W. Kauders (Klima)*: Das Görgessche Durchflutungspolygon. Arch. Elektrotechn. 29(1935)9, S. 599...616.
- [6] *H. Auinger*: Polumschaltbare Dreiphasenwicklungen mit 6 Anschlussenden nach dem Prinzip der Stromrichtungsumkehr. ETZ-A 98(1977)9, S. 628.
- [7] *J.F. Eastham and E.R. Laithwaite*: Pole-change motors using phase-mixing techniques. Proc. IEE 109 A(1962)47, p. 397...409.
- [8] *F.C. Williams, J.F. Eastham and L.S. Pigott*: Analysis and design of pole-change motors using phase-mixing techniques. Proc. IEE 111(1964)1, p. 80...94.
- [9] *J.F. Eastham*: Close-ratio phase-modulated change-pole machines with improved winding balance. Proc. IEE 115(1968)11, p. 1641...1648.
- [10] *V.V. Sastry a.o.*: Speed changing induction machines using phase shift modification. Part I: Application to pole-amplitude modulated machines. Part II: Application to pole-combinations with initial pole-number being a triple-multiple. IEEE-Winter Power Meeting, Transactions Paper, 1971.
- [11] *V.V. Sastry a.o.*: Phase-shift modification technique – a new philosophy for speed-change induction motors. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Technische Universität Wien, 1976; p. D6-1...D6-10.
- [12] *R. Richter*: Lehrbuch der Wicklungen elektrischer Maschinen. Karlsruhe, Verlag G. Braun, 1952.
- [13] *A. Salmon*: Technique de la double modulation de phase. Techniques CEM -(1974)90, p. 34...41.
- [14] *T. Nguyen Uyen*: Moteurs asynchrones à cage à pôles commutables par la méthode de modulation polyphasée. Rev. Gén. Electr. 84(1975)11, p. 821...823.
- [15] *H. Auinger*: Neuartige polumschaltbare Dreiphasenwicklungen mit sechs Anschlussenden für elektrische Maschinen. Siemens Forsch.- u. Entwickl.-Ber. 7(1978)1, S. 1...10.
- [16] *H. Auinger*: Untersuchungen über neuartige polumschaltbare Dreiphasenwicklungen. Dissertation der Technischen Universität Graz, 1977.

Adresse des Autors

Dr. techn. *Herbert Auinger*, Siemens AG, Unternehmensbereich Energietechnik, Nürnberg Maschinen- und Apparatewerk, Postfach 2443, D-8500 Nürnberg 1.