

Detektierung der dritten Harmonischen der Polradspannung – sensorlose Läuferlageerfassung für BLDC-Motoren

Dr. - Ing. Volker Bosch, Robert Bosch GmbH, GB Elektrowerkzeuge, D-70745 Leinfelden

Kurzfassung

Es wird ein einfach zu implementierendes sensorloses Läuferlageerfassungsverfahren für permanentmagnetisch erregte bürstenlose DC-Motoren vorgestellt, das auf sämtliche Maschinen angewendet werden kann, die über einen herausgeführten Maschinensternpunkt verfügen und eine ausgeprägte dritte Harmonische in der Strangspannung aufweisen. Die Schaltung besteht durch einen geringen Hardwareaufwand und arbeitet über einen weiten Drehzahlbereich zuverlässig. Sie kann besonders gut mit einer 120° -Blockkommutierung kombiniert werden. Durch eine einfache Erweiterung der Lageerfassungsschaltung kann die Belastung der Maschine ebenfalls sensorlos erfasst werden.

1 Erfassung der Läuferlage

1.1 Voraussetzungen

Das hier vorgestellte Verfahren erfordert eine Maschine mit einer dreiphasigen, symmetrischen Drehstromwicklung, die eine ausgeprägte dritte Harmonische in der induzierten Spannung aufweist und über einen herausgeführten Sternpunkt verfügt. Die Maschine darf somit keine diametral magnetisierten Dauermagnete in Scheiben- oder Ringform aufweisen [1]. Die Wicklung darf keine Sehnung um $1/3 \tau_p$ aufweisen [2] – somit ist das Verfahren für die üblichen Ausführungen der Einzelzahnwicklung ungeeignet.

1.2 Verfahren

Die dritten Harmonischen der Polradspannung in den drei Maschinensträngen sind gleichphasig, wie **Abbildung 1** zeigt. Wie gut zu sehen ist, sind die dritten Harmonischen der drei Stränge gleichphasig. Zwischen zwei Klemmen der in Sternschaltung betriebenen Maschine heben sich diese Harmonischen somit gegenseitig auf. Dieses gilt für alle Harmonischen deren Ordnungszahl drei oder ein Vielfaches von drei ist, also für $\nu = \text{III, IX, XV, XXI} \dots$ Diese Oberschwingungen können jedoch zwischen dem Sternpunkt der Maschine und einem virtuellen Sternpunkt – gebildet aus drei ohmschen Widerständen – abgegriffen werden [3]. Das Differenzsignal kann von dem Umrichter bei unbestromtem Maschinensternpunkt und ungesättigter Maschine nicht beeinflusst werden. Die dritte Harmonische der Polradspannung ist somit ideal zur Läuferlageerfassung geeignet.

Die Scheitelwerte der dritten Harmonischen fallen mit den Kommutierungszeitpunkten zusammen. Diese sind in **Abbildung 1** durch die Flanken der Ansteuersignale u_a, u_b, u_c der drei Umrichterhalbrücken a, b und c gekennzeichnet.

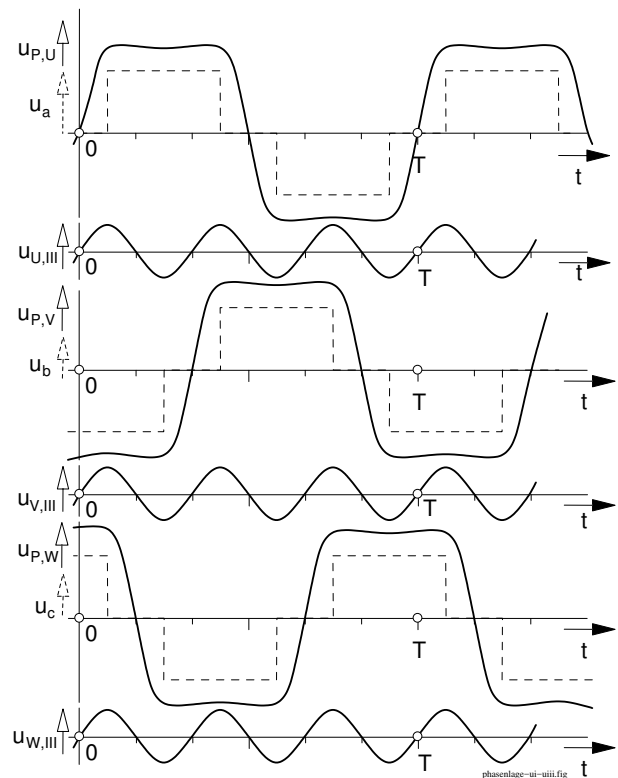


Abbildung 1: Phasenlage der dritten Oberschwingungen der Polradspannungen. $u_{P,U}, u_{P,V}, u_{P,W}$: Polradspannungen Strang U, V und W; $u_{U,III}, u_{V,III}, u_{W,III}$: zugehörige dritte Oberschwingung im Strang U, V und W; u_a, u_b, u_c : Ansteuersignale der Umrichterhalbrücken a, b und c, ohne Berücksichtigung der Pulsweitenmodulation.

Wird die dritte Harmonische (analog) integriert, so fallen aufgrund der damit verbundenen Phasenverschiebung um -90° die Nulldurchgänge des integrierten Signals auf die Kommutierungszeitpunkte – das Signal kann somit direkt

zur Kommutierung der BLDC-Maschine verwendet werden. **Abbildung 2** zeigt das zugehörige Blockschaltbild.

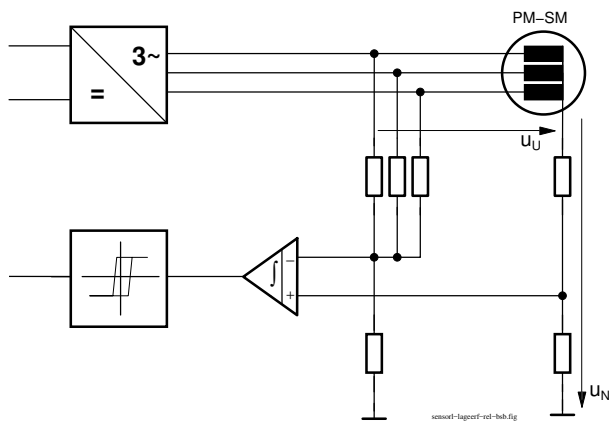


Abbildung 2: Blockschaltbild der Schaltung zur sensorlosen Läuferlageerfassung durch Auswertung der dritten Oberschwingung.

Aus den beiden zwischen Maschinensternpunkt und ohmschen Sternpunkt abgegriffenen Signalen wird in einem einzigen Operationsverstärker das Differenzsignal gebildet und dieses integriert. Anschließend wird das weitgehend sinusförmige Signal durch einen Komparator in ein Rechtecksignal umgesetzt. Dieses kann direkt zur Kommutierung der BLDC-Maschine verwendet werden.

1.3 Schaltung

Die beiden Sternpunktspannungen werden über Spannungsteiler auf ein festes Potenzial – hier das Massepotenzial der Steuerelektronik – bezogen, und den beiden Eingängen eines Differenzverstärkers zugeführt. Das Differenzsignal ist eine reine Wechselspannung. Die Amplitude des Differenzsignals ist proportional zu der Amplitude der Polradspannung. Sie nimmt also mit steigender Maschinendrehzahl zu und kann bei hohen Drehzahlen zur Übersteuerung des Operationsverstärkers führen. Um dieses zu verhindern, ist der Operationsverstärker nicht als reiner Differenzverstärker beschaltet, sondern als Integrator mit Differenzeingängen [4].

Der Integrator erzeugt aus diesem Signal eine Spannung mit konstanter Amplitude. Weitere hier erwünschte Nebeneffekte sind die Phasenverschiebung des sinusförmigen Eingangssignals um -90° sowie die Abschwächung von hochfrequenten Störsignalen, wie sie beispielsweise von der Pulsweitenmodulation der Umrichterbrücke herrühren. **Abbildung 3** zeigt den Schaltplan der verwendeten Integratorschaltung.

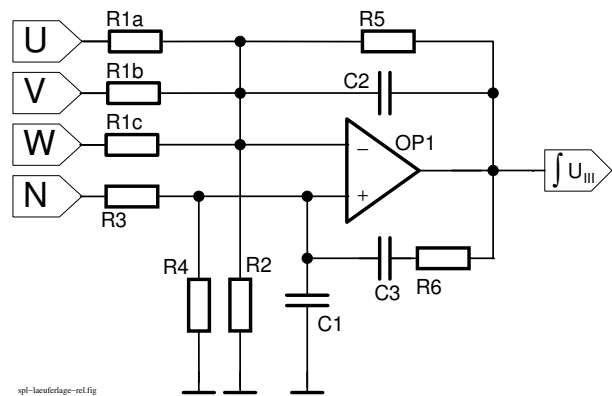


Abbildung 3: Schaltplan des Integrators zur Erfassung der dritten Harmonischen der Polradspannungen für die sensorlose Läuferlageerfassung.

1.4 Anlaufstrategie

Der Anlauf der Maschine unter Verwendung der beschriebenen Läuferlageerfassung durch Detektierung der dritten Harmonischen ist problematisch, da die exakte Läuferposition zu Beginn des Startvorgangs in der Regel nicht bekannt ist. Für viele Anwendungen ist es jedoch zulässig, den Rotor der Maschine zu Beginn des Anlaufvorgangs durch Bestromung der Statorwicklung in eine definierte Position auszurichten. Die absolute Rotorlage kann auch im Stillstand ermittelt werden, indem die Stranginduktivitäten detektiert werden. Abhängig von der jeweiligen Verkettung mit dem Rotorfluss ändern sich die einzelnen Stranginduktivitäten bei positiver oder negativer Bestromung unterschiedlich.

2 Sensorlose Lastdetektierung

2.1 Strommessung im Zwischenkreis

Prinzipiell kann die mechanische Belastung der Maschine über den Strangstrom der Maschine ermittelt werden, beispielsweise im Zwischenkreis des Umrichters. Aufgrund der üblicherweise eingesetzten Pulsweitenmodulation der Umrichterbrücke muss das Messsignal geglättet werden. Es ist aber zu beachten, dass sich der gemittelte Zwischenkreisstrom und der mittlere Maschinenstrom um einen Faktor unterscheiden, der durch das Tastverhältnis der Pulsweitenmodulation bestimmt wird. Verantwortlich für diesen Effekt ist der lückende Zwischenkreisstrom.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Zwischenkreisstrom nur dann abzutasten, wenn Leistung zwischen Maschine und Zwischenkreis ausgetauscht wird, also im Zustand „Treiben“ des Pulsweitenmodulators. Das erforderliche Ansteuersignal für das Abtast- und Halteglied kann prinzipiell aus dem Pulsweitenmodulator abgeleitet werden.

2.2 Lastdetektion durch Erfassung des Polradwinkels

Erzeugt der Umrichter des BLDC-Antriebs 120° breite Spannungsblöcke, so kann die Maschine über den Freilaufstrom des Kommutierungsvorgangs die Phasenlage der Klemmenspannung beeinflussen [5]. Zwischen der von außen nicht messbaren Polradspannung der Maschine und der Klemmenspannung stellt sich der Polradwinkel ϑ ein, wie im Zeigerdiagramm in **Abbildung 4** dargestellt.

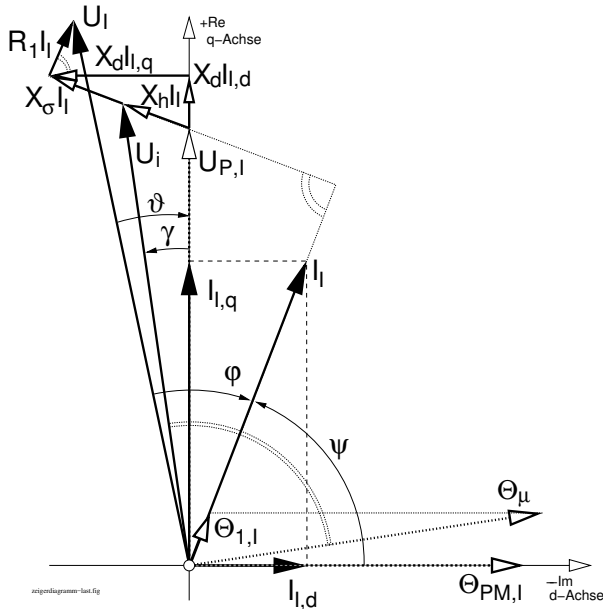


Abbildung 4: Zeigerdiagramm der permanentmagnetisch erregten Drehstromsynchronmaschine mit magnetisch rotationssymmetrischem Läufer ($X_d = X_q$) im Motorbetrieb. Die Verwendung der Polradspannung U_P ist nur zulässig, wenn die Maschine nicht gesättigt ist. Strenggenommen darf nur die aus der Überlagerung der Grundwellen von Rotordurchflutung $\Theta_{Pm,i}$ und Statordurchflutung $\Theta_{1,i}$ gemeinsam induzierte Spannung U_i verwendet werden.

Ist die Läuferlage der Maschine bekannt, so kann aus der Phasenlage der Klemmenspannung direkt der Polradwinkel ϑ abgelesen und als Maß für die Belastung der Maschine verwendet werden. Bei Vollpol-Synchronmaschinen größerer Bauleistung ist das Lastmoment in guter Näherung proportional zum Sinus des Polradwinkels.¹ Diese Näherung gilt aber nur bei vernachlässigbarem ohmschen Wicklungswiderstand und ist bei BLDC-Maschinen üblicher Bauform so nicht zulässig, da diese in der Regel Oberflächenmagnete besitzen und damit eine erheblich geringere Hauptinduktivität aufweisen als vergleichbare elektrisch erregte Synchronmaschinen. Auch ist bei Kleinmaschinen der ohmsche Wicklungswiderstand R_l gegenüber der Strangreaktanz X_{str} meist nicht vernachlässigbar. Der

¹ Aus dem Zeigerdiagramm der Vollpol-Synchronmaschine in **Abbildung 4** ist ersichtlich, dass bei Vernachlässigung des ohmschen Statorwiderstands R_l die Klemmenspannung U_l multipliziert mit dem Sinus des Polradwinkels ϑ genau den Betrag der Spannung $X_{str}I_{1,q}$ ergibt. Der Querachsenstrom $I_{1,q}$ ist der drehmomentbildende Anteil des Statorstroms.

weite Drehzahlbereich, in welchem BLDC-Maschinen üblicherweise betrieben werden, führt dazu, dass das Verhältnis R_l/X_{str} stark drehzahlabhängig ist.

2.2.1 Schaltung zur Erfassung des Polradwinkels

Da die Phasenlage der Polradspannung bereits durch die sensorlose Läuferlageerfassung bekannt ist, genügt es die Phasenlage der Klemmenspannung zu detektieren. Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen entspricht dann dem Polradwinkel.

Hierzu wird eine Schaltung verwendet, die im Wesentlichen der Schaltung zur sensorlosen Läuferlageerfassung gemäß **Abbildung 3** entspricht. Die Schaltung bildet die Differenz aus zwei Strangspannungen der Maschine und integriert diese, um den Einfluss der Drehzahl auf die Amplitude der beiden Eingangssignale zu kompensieren. **Abbildung 5** zeigt die entsprechende Schaltung.

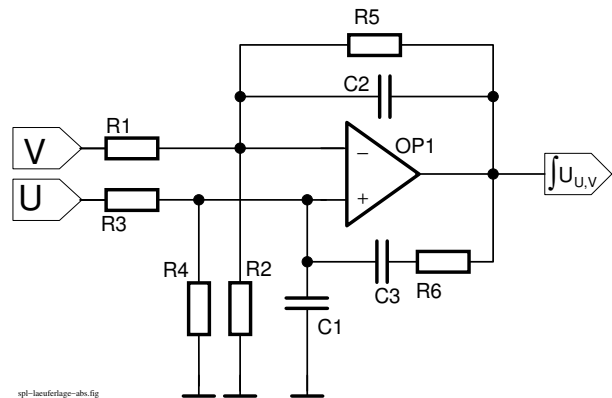


Abbildung 5: Schaltung zur Detektion der Phasenlage der Klemmenspannung.

2.2.2 Leistungsberechnung mittels Polradwinkel

Aus dem Zeigerdiagramm gemäß **Abbildung 4** können die folgenden Zusammenhänge abgelesen werden:

$$-U_1 \sin \vartheta = X_{str} I_{1,q} - R_l I_{1,d} \quad (1a)$$

$$U_1 \cos \vartheta - U_P = X_{str} I_{1,d} + R_l I_{1,q} \quad (1b)$$

$$I_{1,q} = U_1 \frac{R_l \cos \vartheta - X_{str} \sin \vartheta}{R_l^2 + X_{str}^2} - U_P \frac{R_l}{R_l^2 + X_{str}^2} \quad (2)$$

Für die innere Leistung der Maschine gilt:

$$P_i = m U_P I_{1,q} \quad (3)$$

Anstatt den drehmomentbildenden Strom $I_{1,q}$ im Mikrocontroller des Antriebssystems gemäß **Gleichung (2)** zu berechnen, erscheint es sinnvoller den Zusammenhang zwischen Polradwinkel und Querachsenstrom in einer Tabelle abzulegen.

Formelzeichenverzeichnis

| Zeichen | Erklärung | Einheit |
|-------------|-------------------------------|----------|
| I | elektrische Stromstärke | A |
| L | Induktivität | H |
| M | Drehmoment | Nm |
| m | Strangzahl | |
| P | Leistung | W |
| R | elektrischer Widerstand | Ω |
| T | Periodendauer | s |
| t | Zeit | s |
| U | elektrische Spannung | V |
| X | Reaktanz | Ω |
| Θ | Durchflutung | A |
| ϑ | Polradwinkel | |
| τ_p | Polteilung | m |
| φ | el. Phasenwinkel | |
| ψ | Durchflutungswinkel | |

Indizes

| Index | Erklärung |
|-------------|------------------------------------|
| I | Stator, statorseitig |
| I | Grundschiwingung |
| III, V, ... | Oberschiwingung: 3., 5., ... |
| d | Längsachse (direct axis) |
| h | Haupt(-feld) |
| i | induziert, innen |
| P | Polrad-, Pol |
| Pm | Permanentmagnet |
| q | Querachse (quadrature axis) |
| str | Strang- |
| U, V | verkettete Größe |
| U, V, W | Strang- U, V oder W |
| v | Ordnungszahl der Oberschiwingungen |
| σ | Streuung |

Literatur

- [1] SCHÜLER, KARL und KURT BRINKMANN: *Dauer-magnete*. Springer-Verlag, Berlin, 1970.
- [2] MÜLLER, GERMAR: *Theorie elektrischer Maschinen*. Reihe *Elektrische Maschinen*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1995.
- [3] XIE, J.: *Entwicklung eines Scherwellengenerators für den Einsatz in tiefen Bohrlöchern*. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 139. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [4] REUTLINGER, KURT: *Mechatroniksystem für Einzel-spindelantriebe in Textilmaschinen*. Shaker Verlag, Aachen, 1997.
- [5] BOSCH, VOLKER: *Elektronisch kommutiertes Einzel-spindelantriebssystem*. Shaker Verlag, Aachen, 2001.