

# Kosten sparen bei verbesserter Regelung von CO<sub>2</sub>-Anlagen

## Einsatz von Spartransformatoren in der Kältetechnik

Andreas Risius,  
Markus Eberhardt,  
KIMO RHVAC Controls Ltd, Fürth

Im Rahmen der F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 und dem damit verbundenen Phase Down der HFOs gewinnt CO<sub>2</sub> wieder zunehmend an Bedeutung als Kältemittel. Es kann aber beim Betrieb von CO<sub>2</sub>-Verdichterverbunden das Problem auftreten, dass aufgrund des Arbeitspunktes die maximale Stromaufnahme des frequenzgeregelten Verdichters bei einer Frequenz kleiner der maximalen mechanischen Frequenz erreicht wird. Mittels Spartransformator lässt sich die maximale mechanische Frequenz des frequenzgeregelten Verdichters kostengünstig und einfach erreichen.

Die F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 ist auch vier Jahre nach ihrer Verabschiedung präsenter denn je. Um die durch Kältemittel in Umlauf gebrachten CO<sub>2</sub>-Äquivalente gemäß der Verordnung reduzieren zu können, werden unentwegt neue Kältemittel entwickelt und der Blick wird wieder in Richtung der natürlichen Kältemittel gelenkt. Diese haben zwar ein sehr niedriges Global Warming Potential (GWP), dafür jedoch andere Nachteile. In der Regel sind sie entweder brennbar, wie die Kohlenwasserstoffe, oder giftig, wie Ammoniak. Andere haben schwierige thermodynamische Eigenschaften. Dazu zählt auch CO<sub>2</sub> mit einem GWP von

1. Neben einer hohen Energiedichte weist CO<sub>2</sub> jedoch eine verhältnismäßig niedrige kritische Temperatur und hohen kritischen Druck auf. Dies führt dazu, dass CO<sub>2</sub>-Anlagen je nach Aufgabe sub- oder transkritisch betrieben werden.

Während in subkritischen Anlagen die Verdichter für die Tiefkühlung Druckdifferenzen von ca. 30 bar überwinden müssen, können transkritische Anlagen darauf ausgelegt sein, dass der Verdichter den Druck des Kältemittels über 75 bar anhebt. Hierfür gibt es spezielle Verdichter, welche für besonders hohe Drücke entwickelt wurden. Diesen Belastungen müssen nicht nur die Kolben

und das Gehäuse des Verdichters sondern auch der Motor standhalten. Prinzipiell muss der mehrstufige Verdichterverbund so ausgelegt werden, dass keine großen Leistungssprünge beim Zu- und Abschalten von Verdichtern auftreten. Dies ist dann gegeben, wenn der Steuerfaktor  $\geq 90\%$  ist. Für eine bessere Regelung der Anlage soll der erste Verdichter im Verbund über einen Frequenzumrichter drehzahl geregelt werden. Je größer dabei der Frequenzbereich ist, desto besser funktioniert die Regelung und desto weniger Energie wird verbraucht. Dies führt dazu, dass geringere laufende Kosten entstehen.

Im europäischen Drehstromnetz liegt die Versorgungsspannung bei 400 V und 50 Hz und bestimmt dadurch die Eckfrequenz eines in Stern oder Part Winding geschalteten Verdichtermotors. Bis zum Erreichen der Eckfrequenz bleibt der magnetische Fluss  $\Phi$  annähernd konstant. Nach dem Erreichen der Eckfrequenz sinkt der magnetische Fluss  $\Phi$  eines Asynchronmotors und der Bereich der Feldschwächung beginnt (siehe Abb. 1). Das Drehmoment ist in etwa proportional zum Produkt aus magnetischem Fluss und Stromaufnahme.

$$M \sim \Phi * I \quad (1)$$

I: Stromaufnahme  
 $\Phi$ : Magnetischer Fluss  
 M: Verdichterdrehmoment

Da einerseits im Bereich der Feldschwächung der magnetische Fluss abnimmt und

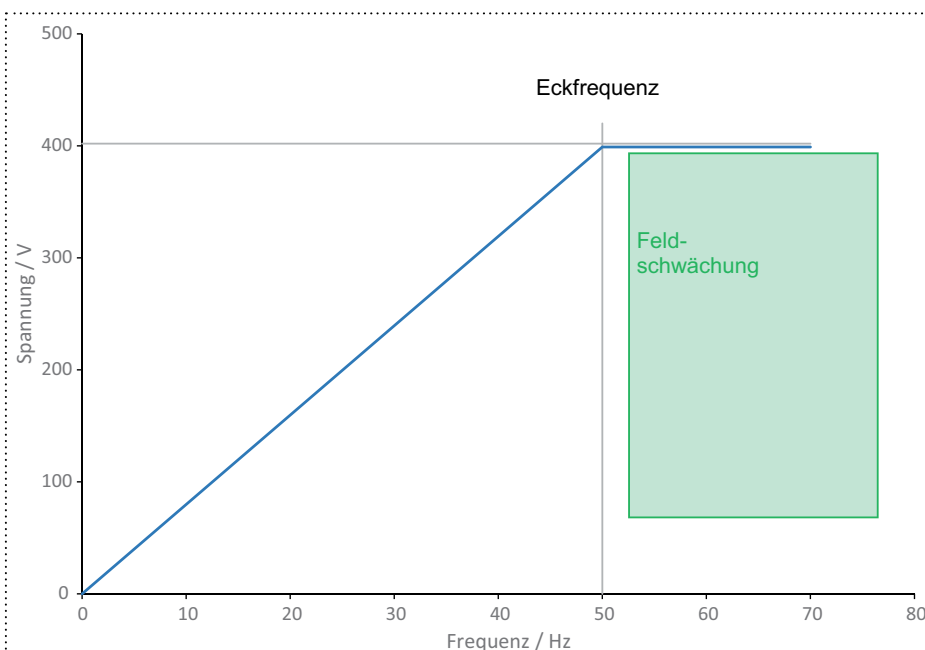


Abbildung 1: Typische U/f-Kennlinie eines Asynchronmotors in Stern

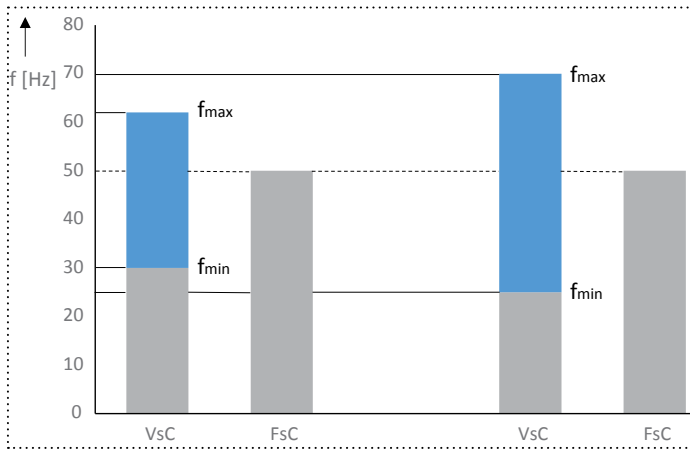


Abbildung 2: Gegenüberstellung der Frequenzbereiche ohne Spartrafo (links) und mit Spartrafo (rechts)

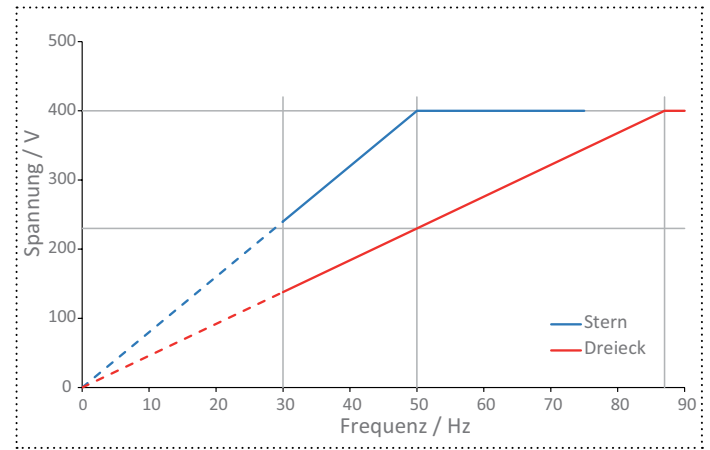


Abbildung 3: Vergleich der U/f-Kennlinien von Stern und Dreieck

andererseits in der Kältetechnik das Drehmoment des Motors von den Prozessparametern wie Kältemittel und Betriebspunkt bestimmt und annähernd konstant gehalten wird, muss der Verdichtermotorstrom steigen.

Bereich der Feldschwächung:

$$M \sim \Phi \downarrow * I \uparrow \quad (2)$$

Bedingt durch den Arbeitspunkt kann die maximale Stromaufnahme des Verdichters bei höherer Frequenz erreicht werden. Ein weiteres Erhöhen der Verdichterfrequenz muss hierbei verhindert werden. In Folge dessen kann der drehzahlgeregelte Verdichter (VsC) nicht bis zu seiner maximal mechanischen Frequenz betrieben werden. Ein schlechter Steuerfaktor ist die Folge. Die Regelbarkeit der Verbundanlage verschlechtert sich, die Anlage beginnt zu takten und der Frequenzumrichter wird nicht richtig ausgenutzt. Der Gesamtwirkungsgrad der



Abbildung 4: Spartransformator

CO<sub>2</sub>-Anlage sinkt, was einen erhöhten Energieaufwand zur Folge hat.

### Steuerfaktor (engl. Control Factor)

Bei dem Steuerfaktor (CF) handelt es sich um das Verhältnis aus dem einstellbaren Kälteleistungsbereichs des drehzahlgeregelten Verdichters (VsC) und der Kälteleistung des nächst zuschaltbaren Verdichters fester Drehzahl (FsC).

$$\text{Steuerfaktor } CF = \frac{Q_{VsC,max} - Q_{VsC,min}}{Q_{FsC}} \quad (3)$$

$Q_{VsC,max}$  : Kälteleistung bei maximaler Frequenz Verdichter veränderbarer Drehzahl

$Q_{VsC,min}$  : Kälteleistung bei minimaler Frequenz Verdichter veränderbarer Drehzahl

$Q_{FsC}$  : Kälteleistung der nächsten festen Stufe

Sollte es sich dabei um identische Verdichter handeln, vereinfacht sich die Gleichung zu einem reinen Verhältnis der Frequenzbereiche.

$$\text{Steuerfaktor } CF = \frac{f_{VsC,max} - f_{VsC,min}}{f_{FsC}} \quad (4)$$

$f_{VsC,max}$  : Maximale Frequenz Verdichter veränderbarer Drehzahl

$f_{VsC,min}$  : Minimale Frequenz Verdichter veränderbarer Drehzahl

$f_{FsC}$  : Frequenz der nächsten, festen Stufen

Um eine gute Regelung zu erhalten, sollte der Steuerfaktor hierbei über 90 % betragen. Dies bedeutet, dass der Frequenzbereich des VsC eine Spanne von mindestens 45 Hz aufweisen sollte. Da die minimale mechanische Frequenz nicht beliebig reduziert werden kann, ist es wichtig, dass die maximal zulässige Frequenz des Verdichters erreicht

wird. Diese liegt in der Regel bei 65 bis 75 Hz (Anschluss in Stern).

(5)

Bsp. : Steuerfaktor  $CF =$

$$\frac{f_{VsC,max} - f_{VsC,min}}{f_{FsC}} = \frac{70 \text{ Hz} - 25 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = \frac{45}{50} = 90 \%$$

Im folgenden Beispiel wird die Problematik der Strombegrenzung eines Verdichters für einen schwierigen Arbeitspunkt anschaulich dargestellt. Es werden entsprechende Annahmen getroffen.

- > CO<sub>2</sub>-Anlage mit zwei identischen Verdichtern
- > Freigegebener Frequenzbereich des Verdichters: 25 – 70 Hz
- > Arbeitspunkt: 0 °C Verdampfung  
38 °C „Verflüssigung“

In diesem Beispiel erreicht der Motor vorzeitig bei 62 Hz die Verdichterstromgrenze. Es ergibt sich ein Steuerfaktor von

$$CF = \frac{62 \text{ Hz} - 25 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 74 \%. \quad (6)$$

Der Frequenzbereich des VsC weist also nur eine Spanne von 37 Hz auf. Um einen Steuerfaktor von 90 % zu erlangen, muss die Differenz mindestens bei 45 Hz liegen. Wird das nicht erreicht, ergibt sich eine Kälteleistungslücke (siehe Abb. 2). Der Frequenzumrichter steuert bedarfsabhängig den FsC an. Aufgrund des Kälteleistungsüberschusses, den die nächste Stufe einbringt, schaltet der Frequenzumrichter den FsC nach kurzer Zeit wieder ab. Der Verdichterverbund beginnt zu takten und gerät dadurch in Schwingung. Um diese Problematik und damit die Regelbarkeit der Anlage zu verbessern und Kosten zu

sparen, können unterschiedliche Maßnahmen getroffen werden.

**Lösung 1: Betrieb in Dreieck**

Um das Frequenzband des Verdichters zu erweitern, kann der Stern/Dreieck-Motor im Dreieck (Delta) angeschlossen werden. Es können bis zu 87 Hz elektrisch erreicht werden (siehe Abb. 3). Dies bedeutet jedoch auch, dass der Verdichterstrom um Faktor  $\sqrt{3}$  steigt. Der Nachteil dieser Lösung ist zum einen, dass alle stromdurchflossenen Komponenten ebenfalls für einen höheren Strom ausgelegt werden müssen. Somit ist an erster Stelle ein größerer Frequenzumrichter nötig. Aufgrund höherer Ströme erhöht sich dadurch auch die Verlustleistung. Zum anderen müssen die Leitungen größere Querschnitte aufweisen und nicht zuletzt ändert sich auch die Größe der elektrischen Schaltergeräte. Die Folge sind wesentlich höhere Investitions- und laufende Energiekosten.

**Lösung 2: Der Spartransformator (bevorzugte Lösung)**

Der Spartransformator besteht im Gegensatz zu klassischen Transformatoren aus nur einer dreiphasigen Wicklung, welche für die Sekundärseite angezapft wird. Dieser wird vor den Frequenzumrichter geschaltet, die Installation geht einfach und schnell. Der Vorteil eines solchen Spartransformators besteht in der sehr kompakten Bauweise (siehe Abb. 4). Dies bedeutet weniger Materialaufwand und somit geringere Kosten. Mittels Spartransformator kann die Eingangsspannung für den Frequenzumrichter von 400 V um 20 % auf 480 V angehoben werden. Mit dieser Erhöhung verschiebt sich das Erreichen der Feldschwächung von 50 Hz auf 60 Hz (siehe Abb. 6). Dies kann den entscheidenden Unterschied im Steuerfaktor ausmachen. In dem vorangegangenen Beispiel bedeutet das, dass der maximale Betriebsstrom auch erst bei einer 20 % höheren Frequenz erreicht wird. Folglich könnte der Verdichter elektrisch bis ca. 74 Hz betrieben werden. Bei der vom Hersteller vorgegebenen maximalen mechanischen Frequenz von 70 Hz wird ein Steuerfaktor von 90 % erreicht.

$$\text{Steuerfaktor } CF = \frac{70 \text{ Hz} - 25 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 90 \% \text{ (7)}$$

In Folge dessen verbessert sich nicht nur der Steuerfaktor, sondern auch die Ausnutzung des Verdichters und des Frequenzumrich-



Abbildung 5: Frequenzumrichter „FrigoPack FU+“

ters. Der Verdichterverbund wird bedarfsabhängig geregelt, gerät nicht in Schwingung, wodurch der Gesamtwirkungsgrad der Anlage deutlich verbessert wird und dadurch Energie und Kosten eingespart werden.

**Zusammenfassung**

Die Regelung von CO<sub>2</sub>-Verbunden kann schwierig sein und bedarf genauer Planung. In diesem Beispiel sollte unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen eine maximale mechanische Verdichtersfrequenz von 70 Hz erreicht werden. Der maximale Verdichterbetriebsstrom wurde aber schon bei 62 Hz erreicht, was ein weiteres Anheben der Frequenz verhindert. Es ergibt sich ein Steuerfaktor von nur 74 %.

Mit dem Betrieb in Dreieck kann der Dreh-

zahlbereich des Leitverdichters vergrößert werden. Dies ist jedoch mit wesentlichem Kostenaufwand verbunden.

Eine kostengünstige und dazu sehr einfache Lösung ist der Einsatz eines Spartransformators. Dieser wird vor den Frequenzumrichter verschaltet, wodurch sich die Spannung von 400 V auf 480 V erhöht. Der Bereich der Feldschwächung verschiebt sich von 50 Hz auf 60 Hz. Der maximale elektrische Betriebsstrom  $I_{max}$ , der vorher bei 62 Hz erreicht wurde, wird nun erst bei theoretischen 74,4 Hz ( $f_{max}$ , mechanisch 70 Hz) erreicht. Somit ergibt sich ein vergrößerter Frequenzbereich und das Ziel eines Steuerfaktors von 90 % wird erreicht.

KIMO RHVAC Controls Ltd bietet für diesen Anschluss eine Komplettlösung an. Der ausschließlich für die Kältetechnik entwickelte Frequenzumrichter „FrigoPack FU+“ (siehe Abb. 5) passt sich durch den vorgeschalteten Spartransformator automatisch der höheren Eingangsspannung an. Die Eckfrequenz kann also bei jedem Verdichter, unabhängig von der Größe, um 20 % verschoben werden. Oft kann dadurch die maximal zulässige mechanische Frequenz für jeden Arbeitspunkt erreicht werden.

Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> hat die Kombination aus Spartransformator und Frequenzumrichter in transkritischen CO<sub>2</sub>-Anlagen besondere Bedeutung. Sie ist aber auch für andere Systeme geeignet, bei denen die Strombegrenzung des Verdichtermotors einer guten Regelung im Weg steht.

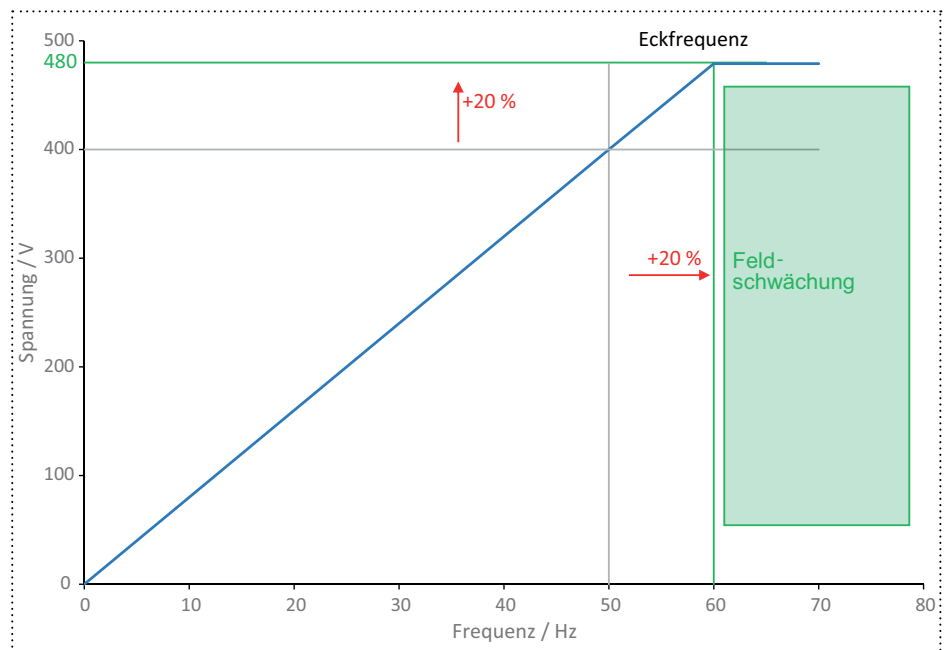


Abbildung 6: U/f-Kennlinie eines Asynchronmotors mit Spartransformators