Wie ESO funktioniert

Warum ein Betrieb mehr Strom bezieht, als er braucht, und was die Anlage dagegen tut.

Funktionsbeschreibung

© ESO Elektronische Stromoptimierung Inh. Michael Grün

Ausgangslage

Strom, der keine Arbeit leistet

In den meisten Gewerbe- und Industriebetrieben fließt deutlich mehr Strom durch die Leitungen, als für die eigentliche Arbeit nötig wäre. Der Grund liegt nicht in ineffizienten Maschinen, sondern im Lastverhalten der angeschlossenen Verbraucher.

Moderne Anlagen haben dieses Verhalten grundlegend verändert. Frequenzumrichter, Schaltnetzteile, LED-Technik, Ladeinfrastruktur und IT entnehmen den Strom nicht mehr gleichmäßig. Motoren, Transformatoren und Schweißanlagen ziehen zusätzlich Magnetisierungsstrom, der zwischen Netz und Verbraucher hin und her pendelt. Und selten sind die drei Phasen gleich stark belastet.

Alle diese Anteile leisten keine Arbeit. Sie fließen trotzdem - durch Kabel, durch die Schaltanlage, durch den Transformator. Weil die Verluste in Leitungen mit dem Quadrat des Stroms steigen, richten sie überproportionalen Schaden an: Wärme, die bezahlt werden muss, Betriebsmittel, die schneller altern, und Anschlusskapazität, die belegt ist, ohne genutzt zu werden.

STÖRANTEIL	WOHER ER KOMMT	WAS ER ANRICHTET
Geringer Leistungsfaktor	Elektromotoren, Transformatoren, Schweißanlagen	belastet Zuleitung und Transformator, erzeugt Wärmeverluste, belegt Anschlusskapazität
Oberschwingungen	Frequenzumrichter, Schaltnetzteile, LED, USV, Ladetechnik	erhöhen den Effektivstrom, überhitzen Wicklungen und den Neutralleiter
Schieflast	ungleich verteilte einphasige Verbraucher	Ausgleichsströme, Zusatzverluste, unruhig laufende Elektromotoren

Wirkprinzip

Den Störstrom vor Ort erzeugen statt beziehen

> ### In einem Satz
>
> ESO ist eine aktive, dynamische, halbleitergesteuerte, stufenlose Elektronische Strom- und Netzoptimierungsanlage für induktive und kapazitive Lasten.

Die Anlage wird parallel zur bestehenden Installation an die Hauptverteilung angeschlossen. Ein Rogowski-Spulensatz - drei Spulen, je Außenleiter eine - erfasst den Strom, den der Betrieb zieht. Eine Recheneinheit zerlegt diesen Strom in Echtzeit in seine Bestandteile und erkennt, welcher Teil davon Arbeit verrichtet und welcher nicht.

Anschließend erzeugt die Anlage die störenden Anteile selbst - gegenphasig. Am Anschlusspunkt überlagern sich beide Ströme und heben sich auf. Was aus dem Netz nachfließen muss, ist nur noch der Teil, der tatsächlich Arbeit leistet.



Der gemessene Laststrom und der gegenphasig erzeugte Kompensationsstrom ergeben zusammen einen sinusförmigen Netzstrom.

Am Prozess ändert sich dabei nichts. Die Maschinen laufen unverändert; die Spannung wird nicht gesenkt, sondern harmonisiert und stabilisiert. Verändert wird ausschließlich, wie viel Strom dafür durch die Infrastruktur fließen muss.

Wo das besonders zählt

Der Vorteil wird dort am größten, wo sich die Last schnell ändert. Ein Drehstrommotor zieht beim Direktanlauf das Fünf- bis Achtfache seines Nennstroms. Pressen, Schweißanlagen, Krananlagen und Separatoren erzeugen Lastspitzen im Sekundenbruchteil. Eine schützgeschaltete Kompensationsanlage kann solchen Sprüngen nicht folgen - sie schaltet in Stufen und braucht zwischen zwei Schalthandlungen die Entladezeit der Kondensatoren, in der Praxis 40 bis 60 Sekunden. Die ESO-Anlage regelt innerhalb eines Bruchteils einer Netzperiode.

Vergleich

Was ESO von klassischer Kompensation unterscheidet

Klassische Kompensationsanlagen schalten Kondensatoren in festen Stufen zu. Das funktioniert bei gleichmäßiger Last, stößt aber schnell an Grenzen. ESO arbeitet nicht mit Stufen, sondern erzeugt einen Strom beliebiger Größe und Phasenlage.

	GESCHALTETE KONDENSATORANLAGE	ESO
Regelung	in festen Stufen	stufenlos
Genauigkeit	Über- oder Unterkompensation je nach Stufung	exakt auf den Sollwert geregelt
Richtung	nur kapazitiv	induktiv und kapazitiv
Reaktionszeit	Sekunden, bestimmt durch Schützlaufzeit und Entladepausen	unter 5 Millisekunden
Oberschwingungen	werden nicht kompensiert; unverdrosselte Anlagen können mit der Netzinduktivität in Resonanz geraten	gezielt kompensiert
Verdrosselung	meist erforderlich, und mit dem Netzbetreiber abzustimmen	entfällt
Schieflast	üblicherweise nicht behandelt	aktiv symmetriert
Verschleiß	Schütze und Kondensatoren schalten mechanisch	keine mechanischen Schalthandlungen im Leistungspfad
Bauform	Standschrank, abhängig von der Stufenzahl	Wandgerät

Der entscheidende Punkt

Weil ESO stufenlos, in beide Richtungen und innerhalb von Millisekunden regelt, wirkt die Anlage auch dort, wo gestufte, schützgeschaltete Kompensation an ihre Grenzen kommt: Bei schnell wechselnden Lasten, bei hohem Umrichteranteil und bei ungleich belasteten Phasen. Genau das sind die Situationen, die in modernen Betrieben den Ausschlag geben

Nutzen

Was der Betrieb davon hat

NUTZEN	WARUM
Geringerer Stromfluss im eigenen Netz	Der Scheinstrom in Kabeln, Schaltanlage und Transformator sinkt. Die Verluste steigen quadratisch mit dem Strom und sinken deshalb überproportional.

NUTZEN	WARUM
Geringerer Spannungsfall	Ein geringerer nicht wirksamer Stromanteil bedeutet weniger Spannungsabfall über Zuleitung und Transformator. Die Spannung am Verbraucher wird stabiler.
Weniger Wärme in den Betriebsmitteln	Geringere thermische Belastung von Motoren, Transformatoren und Leitungen verlängert deren Lebensdauer.
Entlasteter Neutralleiter	Die durch drei teilbaren Oberschwingungsordnungen addieren sich im Neutralleiter statt sich aufzuheben. Ihre Kompensation entlastet ihn.
Freie Kapazität im Anschluss	Der geringere Scheinstrom schafft Reserve und kann teure Erweiterungen vermeiden oder verschieben.
Erfüllte Anschlussvoraussetzung	§ 16 Abs. 2 der Niederspannungsanschlussverordnung setzt einen Verschiebungsfaktor zwischen 0,9 kapazitiv und 0,9 induktiv voraus; andernfalls kann der Netzbetreiber den Einbau von Kompensationseinrichtungen verlangen.

Nachweis

Wie sich der Effekt belegen lässt

Die Wirkung ist keine Rechengröße, sondern messbar - auf drei Wegen: erstens der Vergleich von Last- und Netzseite am Display der Anlage, der belastbare Nachweis, im laufenden Betrieb unmittelbar vergleichbar; zweitens der Vergleich der Stromrechnungen vor und nach Inbetriebnahme, zwölf Monate gegen zwölf Monate, bereinigt um Preisänderungen sowie nachweisliche Änderungen von Produktionsverhalten und Maschinenpark - das für die Einsparungsgarantie nach Ziffer 13 der AGB vereinbarte Verfahren; drittens der Lastgangvergleich aus Viertelstundenwerten des Netzbetreibers oder eines Energiemanagementsystems über vergleichbare Zeiträume, unabhängig von Preisbestandteilen.

Den belastbaren Nachweis liefert das Display; Rechnungs- und Lastgangvergleich sind die Maßnahmen, mit denen sich das Ergebnis über die Zeit dokumentieren lässt. Abnahmeprotokoll und Videodokumentation sind nach Ziffer 10 der AGB Voraussetzung für Garantieansprüche.

Auf einen Blick

Netzanschluss	400 V, dreiphasig mit Neutralleiter
Reaktionszeit	unter 5 Millisekunden
Leistungsfaktor nach Kompensation	mindestens 0,99

Funktionen	Leistungsfaktor, Oberschwingungen, Schieflast
Montage	Wandmontage, parallel zur Last an der Hauptverteilung
Betrieb	vollautomatisch; Display mit Messwerten je Außenleiter, Schnittstelle RS485 (Modbus RTU); im Regelbetrieb sind keine Einstellungen erforderlich
Wartung	Sichtkontrolle und Freihalten der Belüftung

Regelung

Die Anlage bildet einen geschlossenen Regelkreis aus vier Stufen, der ohne Unterbrechung durchlaufen wird.

STUFE	VORGANG
Erfassung	Ein Rogowski-Spulensatz (drei Spulen) misst den Strom in den Außenleitern. Die Anlage misst zusätzlich die Netzspannung und bestimmt daraus Frequenz und Phasenlage.
Zerlegung	Der Signalprozessor zerlegt den gemessenen Strom in Wirkstrom, nicht wirksamen Stromanteil, Oberschwingungsströme und Gegensystem. Dafür kommen eine Spektralanalyse und die momentane Leistungstheorie (p-q-Theorie) zum Einsatz.
Sollwertbildung	Aus den unerwünschten Anteilen und der werkseitig festgelegten Kapazitätsaufteilung wird der Sollwert für den Ausgangsstrom gebildet.
Erzeugung	Die Leistungshalbleiter werden mit bis zu 25,6 kHz getaktet und erzeugen den Sollstrom. Am Anschlusspunkt überlagert er sich dem Laststrom.

Zur Dynamik

Die Anfangsreaktion der Leistungsstufe erfolgt in weniger als 50 Mikrosekunden. Der nicht wirksame Stromanteil und die Schieflast werden in weniger als 5 Millisekunden vollständig ausgeregelt, also innerhalb eines Viertels einer Netzperiode. Die Oberschwingungskompensation setzt eine Spektralanalyse über mindestens eine Grundschwingungsperiode voraus und wird daher innerhalb weniger Netzperioden wirksam.

Zum Vergleich: Schützgeschaltete Kompensationsanlagen benötigen wegen der Entladezeit der Kondensatoren zwischen zwei Schalthandlungen typisch 40 bis 60 Sekunden.

Funktionen

Die drei Optimierungsfunktionen

Leistungsfaktoroptimierung

Induktive Verbraucher benötigen Magnetisierungsstrom. Er verrichtet keine Arbeit, pendelt aber zwischen Netz und Verbraucher und belastet dabei jede Komponente auf dem Weg. Die Anlage stellt diesen Anteil unmittelbar am Verbraucher bereit; die vorgelagerte Infrastruktur wird davon entlastet. Die Regelung ist stufenlos und arbeitet in beide Richtungen; erreichbar ist ein Leistungsfaktor von mindestens 0,99.

Oberschwingungen

Nichtlineare Verbraucher entnehmen den Strom nicht sinusförmig. Die entstehenden Stromanteile bei Vielfachen der Netzfrequenz erhöhen den Effektivstrom, ohne zur Arbeit beizutragen. Besonders kritisch sind die durch drei teilbaren Ordnungen, die sich im Neutralleiter addieren statt sich aufzuheben. Die Anlage analysiert das Spektrum des Laststroms und speist die Oberschwingungsströme gegenphasig ein. Behandelt werden die Ordnungen 2 bis 13; höhere Ordnungen werden nicht kompensiert. Gerade Ordnungen sind im Auslieferungszustand nicht aktiviert; sie können auf Anfrage werkseitig konfiguriert werden. Für die Oberschwingungskompensation stehen 60 Prozent der Bemessungsleistung zur Verfügung; der verbleibende Anteil steht für die Leistungsfaktorkorrektur und die Schieflastkompensation zur Verfügung. Betriebsart und Ordnungsbereich sind werkseitig festgelegt.

Schieflast

Ungleich belastete Außenleiter erzeugen Gegen- und Nullsystemströme. Die Anlage verlagert Wirkleistung zwischen den Phasen und senkt den Unsymmetriegrad auf unter 5 Prozent. In Vierleiternetzen sinkt dadurch zugleich der Neutralleiterstrom.

Aufteilung der Leistung

Die drei Funktionen greifen auf dieselbe Leistung zu. Die Aufteilung wird von ESO festgelegt und werkseitig hinterlegt; sie muss bei der Installation weder ermittelt noch eingegeben werden. Weicht die Lastzusammensetzung im Betrieb deutlich von der Auslegung ab, kann der ESO-Service die Aufteilung anpassen.

Messung, Anzeige und Schnittstelle

Die Anlage misst fortlaufend auf der Netz- und auf der Lastseite und zeigt beide Seiten getrennt an: Spannung, Strom, Wirkleistung, nicht wirksamer Stromanteil, Leistungsfaktor, Verzerrungs- und Unsymmetriegrad je Außenleiter, dazu Spektrumanalyse und Ereignisspeicher mit Zeitstempel. Für ein Energiemanagement- oder Leitsystem stehen die Messwerte über RS485 (Modbus RTU) zum zyklischen Auslesen bereit; Betriebs- und Störmeldung liegen an zwei Relaisausgängen, Ein- und Ausschalten ist über zwei Digitaleingänge möglich; dafür muss die Startart auf Tasterstart stehen. Die Anlage ist ein Regelgerät mit Messfunktion, kein Zähler: Für Energiekennzahlen in Kilowattstunden gehört ein Energiezähler an den betrachteten Abgang. Die Schnittstelle arbeitet mit 9600 Baud, 8 Datenbits, ohne Parität und mit einem Stoppbit; gelesen wird mit Funktionscode 03, je Register ein 16-Bit-Wert. Das Auslesen verändert keine Einstellung der Anlage.

Resonanz

Abgrenzung gegenüber geschalteter Kompensation

Der Unterschied liegt nicht im Ziel, sondern in der Art der Bereitstellung. Eine Kondensatoranlage schaltet feste Kapazitätswerte zu und arbeitet damit zwangsläufig in Stufen. Die ESO-Anlage erzeugt einen Strom beliebiger Amplitude und Phasenlage.

Warum die Resonanzfrage entfällt

Eine Kondensatoranlage bildet mit der Induktivität des vorgelagerten Netzes einen Parallelschwingkreis. Die Resonanzordnung folgt näherungsweise der Wurzel aus dem Verhältnis von Kurzschlussleistung zu Kompensationsleistung. Liegt sie nahe einer im Netz vorhandenen Oberschwingungsordnung, wird diese um den Gütefaktor verstärkt statt gedämpft - deshalb die Verdrosselung, die die Resonanzstelle gezielt unter die fünfte Ordnung legt.

Im geregelten Frequenzbereich stellt die ESO-Anlage für Oberschwingungen keine Kapazität dar, sondern eine geregelte Stromquelle mit hoher Ausgangsimpedanz. Ein Parallelresonanzkreis wie bei einer Kondensatoranlage entsteht dadurch nicht. Oberhalb der Regelbandbreite wirkt das Ausgangsfilter der Anlage.

Praktisch folgt daraus ein zweiter Vorteil: Nach VDE-AR-N 4100 ist die Verdrosselung einer Kompensationsanlage mit dem Netzbetreiber abzustimmen. Entfällt die Verdrosselung, entfällt auch dieser Abstimmungsschritt; die Anmeldung der Kompensationseinrichtung und die Klärung der Verträglichkeit mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen beim Netzbetreiber bleiben.

Netz

Effekte im Netz des Betriebs

Die Wirkung setzt am Anschlusspunkt an und breitet sich von dort netzaufwärts aus. Alles, was zwischen dem Anschlusspunkt der Anlage und der Einspeisung liegt, führt weniger Strom.

BETRIEBSMITTEL	EFFEKT
Zuleitungen und Kabel	Geringerer Effektivstrom senkt die Stromwärmeverluste. Diese steigen quadratisch mit dem Strom.
Spannungsfall	Der Spannungsabfall über Zuleitung und Transformator sinkt mit dem nicht wirksamen Stromanteil. Die Spannung am Verbraucher wird stabiler.
Transformator	Geringere Belastung durch nicht wirksame Stromanteile und Oberschwingungen senkt Wirbelstrom- und Zusatzverluste und damit die Erwärmung.
Neutralleiter	Die Kompensation der durch drei teilbaren Ordnungen senkt den Neutralleiterstrom, der andernfalls den Außenleiterstrom übersteigen kann.
Schaltanlage	Geringerer Scheinstrom bedeutet geringere thermische Belastung von Schienen, Klemmstellen und Schutzorganen.
Drehstrommotoren	Symmetrische Ströme vermeiden Gegensystemanteile und die damit verbundenen Zusatzverluste in der Wicklung.
Anschlusskapazität	Der geringere Scheinstrom schafft Reserve im vorhandenen Anschluss und kann Erweiterungen verschieben.

Grenzen

Eine belastbare technische Darstellung muss die Grenzen ebenso benennen wie die Wirkung. Die folgenden Punkte sind bauartbedingt und lassen sich nicht durch Parametrierung umgehen.

Einsatzgrenzen

> Die Anlage kompensiert Ströme, keine Spannungen. Eine aus dem vorgelagerten Netz eingespeiste Spannungsverzerrung kann sie nicht beseitigen. Die Anlage ist für Netze mit einem Spannungsverzerrungsgrad unter 10 Prozent am Anschlusspunkt ausgelegt; bei höheren Werten kann der einwandfreie Betrieb beeinträchtigt sein, die Aufstellsituation ist dann vorab mit ESO abzustimmen. Der Wert wird von ESO nicht erhoben, sondern vorausgesetzt. Diese Grenze ist eine gerätespezifische Angabe; zum Vergleich begrenzen EN 50160 und IEEE Std 519-2022 den Spannungsverzerrungsgrad in der Niederspannung auf 8 Prozent.

© ESO Elektronische Stromoptimierung Inh. Michael Grün

- Die Anlage ist kein Überspannungs- oder Blitzschutz. Entsprechende Schutzeinrichtungen sind nach DIN EN 62305 und DIN VDE 0100-534 gesondert vorzusehen.
- Die Anlage ist keine unterbrechungsfreie Stromversorgung und überbrückt keine Netzausfälle. Gegen Spannungseinbrüche und Kurzunterbrechungen wirkt sie nicht.
- Die Anlage ist kein Spannungsreduziergerät. Sie senkt die Netzspannung nicht.
- Wo keine Störanteile vorliegen, gibt es keinen Wirkungsansatz. Bei überwiegend ohmscher, symmetrischer und linearer Last ist die Anlage wirkungslos.
- Die Kennwerte der Kompensationswirkung - Leistungsfaktor mindestens 0,99, Stromverzerrung und Unsymmetrie höchstens 5 Prozent - werden ab einer Auslastung von 50 Prozent des Kompensationsstroms erreicht. Die Kompensationsleistung ist auf den Bemessungswert der Anlage begrenzt; übersteigt der Bedarf im Betrieb diesen Wert, kompensiert die Anlage bis zu ihrer Bemessungsleistung, und die genannten Zielwerte werden nicht erreicht.
- Die Anlage arbeitet netzparallel im Niederspannungsnetz. Für den Betrieb am Ersatzstromaggregat, im Inselnetz oder an einer nicht netzparallelen Versorgung ist sie nicht bestimmt. Netzparallele Photovoltaik- oder Blockheizkraftwerksanlagen am Standort stehen dem Betrieb nicht entgegen.
- Im selben Verteilnetz darf keine verdrosselte Anlage zur Leistungsfaktorkorrektur in Betrieb sein; eine unverdrosselte Bestandsanlage muss im Messbereich des Spulensatzes liegen.
- Ist der Anlage eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung vorgelagert, muss sie allstromsensitiv sein (Typ B; ein Typ B+ erfüllt die Anforderung ebenfalls); Typ A und F sind nicht zulässig. Der Aufstellort ist trocken und staubarm, ohne Kondensation, leitfähigen Staub oder aggressive Atmosphäre; die Montagewand trägt das Gewicht dauerhaft.

Beschaffung

Mindesteinsparung. Es gilt die Zusage der Mindesteinsparung von 5 Prozent nach Ziffer 13 der AGB - eine selbständige Garantie im Sinne des § 443 BGB. Angesetzt ist die im Angebot ausgewiesene induktive Last. Wird die Schwelle unterschritten, können Sie die Rückabwicklung verlangen: ESO erstattet den Kaufpreis Zug um Zug gegen Rückgabe der Anlage binnen 30 Tagen und trägt den Rückversand; Aus- und Einbau sind nicht umfasst. Die Garantie setzt voraus, dass am Anschlusspunkt bei Vertragsschluss keine weitere Anlage zur Leistungsfaktorkorrektur und keine Spannungsreduzierungsanlage betrieben wurde.

Förderung. Die Anlage ist förderfähig - nach der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG EM) oder über Modul 3 der Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der

Wirtschaft (EEW). BEG EM und EEW Modul 3 sind Alternativen - je Vorgang genau ein Weg. Auf die Förderung besteht kein Rechtsanspruch.

Bauseitige Leistungen. ESO bietet keinen eigenen Montageservice an: Der Anschluss ist durch eine Elektrofachkraft zu veranlassen. Bauseits zu stellen sind der Aufstellort mit ausreichender Belüftung (Lufteintritt mindestens 100 mm, Luftaustritt mindestens 200 mm frei), die Vorsicherung als Halbleiterschutzsicherung der Betriebsklasse gR oder aR, die Zuleitung, die Wandbefestigung sowie für die Strommessung die 5-A-Messleitung, die 230-V-Versorgung der Netzteile und ein Montageplatz auf Hutschiene; gegebenenfalls eine allstromsensitive Fehlerstrom-Schutzeinrichtung.

Fazit

Die Anlage senkt den Stromverbrauch nachweislich um bis zu 15 % des Jahresverbrauchs. Eingespart wird echte, bezahlte Arbeit, und das auf zwei Wegen: Die Stromwärmeverluste in Kabeln, Schaltanlage, Transformator und Neutralleiter sinken quadratisch mit dem Strom, und Motoren laufen ohne Schieflast mit besserem Wirkungsgrad - sie beziehen für dieselbe Arbeit weniger Energie. Beides erfasst der Zähler am Übergabepunkt: Jede vermiedene Kilowattstunde stand bisher auf der Stromrechnung.

Zugleich verbessert die Anlage die Netzqualität im gesamten Betriebsnetz: sinusförmiger Strom, stabilere Spannung, symmetrische Belastung. Davon profitieren die angeschlossenen Maschinen - Motoren, Transformatoren und Leitungen laufen kühler, verschleißen langsamer und fallen seltener aus. Jede eingesparte Kilowattstunde reduziert außerdem den CO2-Ausstoß des Unternehmens. Und weil das System modular und dezentral aufgebaut ist, lässt es sich an der Hauptverteilung ebenso einsetzen wie an einzelnen Unterverteilungen und bei wachsendem Bedarf um weitere Module erweitern - ohne Eingriff in Maschinen oder laufende Prozesse.

© ESO Elektronische Stromoptimierung Inh. Michael Grün