

Florian Kogler, Gerald Kalteis, Johannes Heissenberger und Heinrich Prankl

Mobiler Zapfwellengenerator für landwirtschaftliche Anwendungen

Mithilfe des von der TU Wien entwickelten mobilen Zapfwellengenerators können vom Traktor aus diverse Systeme und Anbaugeräte mit elektrischem Strom versorgt werden. Neben einem 1x230-V- sowie einem 3x400-V-Ausgang, gibt es auch die Möglichkeit eine Asynchronmaschine (ASM) gesteuert sowie eine permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM) sensorlos geregelt zu betreiben. Somit können unter anderem auch Antriebe am Anbaugerät direkt bedient werden. Weiters kann unabhängig von der Zapfwellendrehzahl eine konstante Gleichspannung zur Verfügung gestellt werden.

eingereicht 10. März 2014

akzeptiert 10. April 2014

Schlüsselwörter

Zapfwellengenerator, elektrische Antriebe, permanentmagneterregte Synchronmaschine, lagegeberlos, Inform

Keywords

PTO generator, electric drives, permanent magnet synchronous machine, sensorless, Inform

Abstract

Kogler, Florian; Kalteis, Gerald; Heissenberger, Johannes and Prankl, Heinrich

Mobile PTO generator for agricultural usage

Landtechnik 69(3), 2014, pp. 147–151, 7 figures, 8 references

A developed and constructed power take-off generator is used as a mobile electrical power supply. Such a device drives asynchronous motors in open-loop mode and permanent magnet synchronous motors in sensorless closed-loop mode. Furthermore, it is also possible to apply AC voltage, 3x400 V and 1x230 V, to use external electrical appliances. The possibility for constant DC link voltage independent of the PTO revolutions is also shown.

■ In der Vergangenheit wurden landwirtschaftliche Geräte fast ausschließlich durch direkte mechanische Kopplung der Zapfwelle oder über hydraulische Antriebe benutzt. Heute sind jedoch die Regelbarkeit und die Effizienz der Geräte ausschlaggebend. Elektrische Antriebe sind hier von großem Vorteil, da sie eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig geringem Gewicht und einen Wirkungsgrad von 80 bis 90 Prozent aufweisen. Außerdem ist eine hochdynamische Drehzahl- und Momentregelung einfach zu implementieren. Neben den bisherigen elektrischen Komponenten in der Landwirtschaft wird in Zukunft auch der Anteil der elektrischen Antriebe im höheren Leistungsbereich bis hin zu Traktionsantrieben steigen, wie Marktforschungen zeigen [1]. Die benötigte elektrische Leistung solcher Antriebe muss vom Traktor bereitgestellt werden und wird in Zukunft bereits in der Serienausstattung der Zugmaschine zur Verfügung stehen. In der Übergangszeit wird für die Stromversorgung ein mobiler Zapfwellengenerator verwendet, um die Anforderungen elektrischer Anbaugeräte zu erfüllen [2; 3].

Anforderungen an einen Zapfwellengenerator

Ein Zapfwellengenerator muss portabel sein und sollte leicht anzuschließen und zu demontieren sein. Von nahezu allen Herstellern wird dafür die Kombination einer Dreipunktaufhängung mit einer Steckdose gemäß dem Standardisierungsvorschlag der AEF [4] am Markt angeboten. Je nach Hersteller ist dieser Generator dann auch mobil einsetzbar, d.h. am Feld bei voller Fahrt betriebsbereit. Um einen ausgangsseitigen Umrichter anzuspiesen, der dann wiederum einen Elektromotor versorgt, ist es wichtig, eine konstante Zwischenkreisspannung bereitzustellen. Da die induzierte Spannung des Generators von der Drehzahl abhängig ist, sorgt ein aktiver Eingangsumrichter für die konstante Regelung dieser Spannung unabhängig von der Drehzahl der Verbrennungskraftmaschine und somit der Zapfwelle. Solch ein Umrichter ist bei diversen Herstellern

Abb. 3



1200V-250A-IGBT wassergekühlter Leistungsumrichter
(Foto: TU Wien)

Fig. 3: 1200V-250A-IGBT water cooled high power inverter

Steigt die Drehzahl der Zapfwelle über die nominale Drehzahl entsprechend der Zwischenkreisspannung, so wird der Generator im Feldschwächbetrieb betrieben. Mit dem Feldschwächparameter wird der d-Strom erhöht und somit die induzierte Spannung der Maschine auf die Zwischenkreisspannung erniedrigt. Der Umrichter arbeitet als aktiver Tiefsetzsteller.

Neben der konstanten Gleichspannung gibt es weitere verschiedene Ausgänge, die über einen zweiten Leistungsumrichter zur Verfügung gestellt werden:

- Asynchron-Modus: Steuerung einer ASM (open-loop)
- Synchron-Modus: Regelung einer PSM (closed-loop)
- Netzinselbetrieb: 3x400 V / 1x230 V mit jeweils 50 Hz

Eingangs- sowie Ausgangsumrichter sind baugleich (**Abbildung 3**). Die Platine des Leistungsteils ist auf einem Aluminiumblock aufgebracht, an den eine Kühlung angeschlossen werden kann (Anschlüsse rechts, **Abbildung 3**). Ebenso sind die Zwischenkreiskondensatoren (schwarze Zylinder), die Strommessungen (schwarze Ringe am oberen Rand mittig) sowie die Spannungsmessung (blaue Blöcke am rechten Rand) zu erkennen. Zentral ist die Ansteuerung der IGBT-Leistungstransistoren (Insulated Gate Bipolar Transistor) angebracht.

Über dem Leistungsteil sitzt die Steuerplatine mit dem Mikroprozessor und den Schnittstellen für diverse Ein- und Ausgangssignale [6].

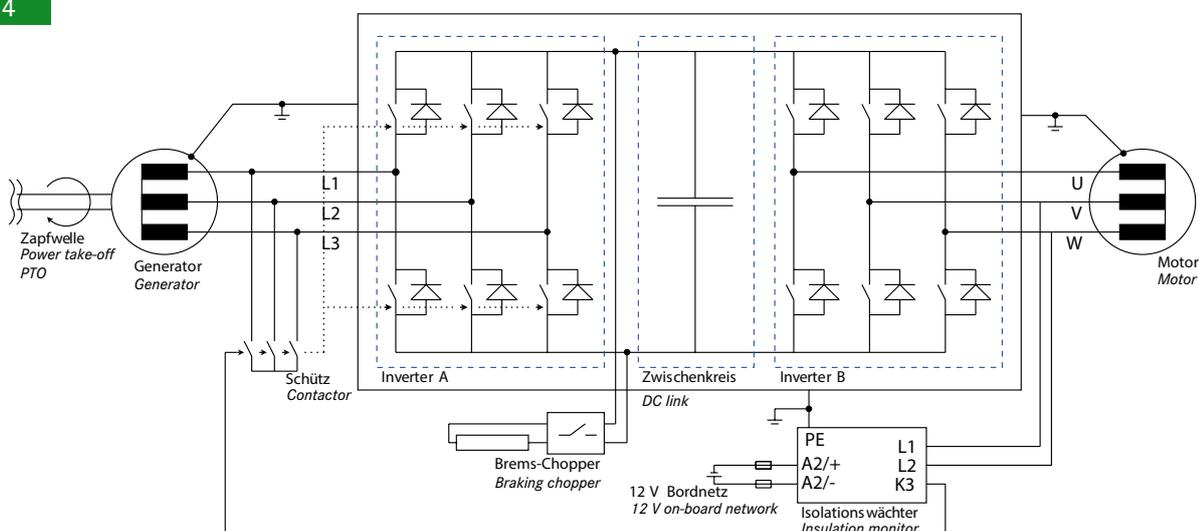
Der Leistungsfluss der gesamten Anwendung ist in **Abbildung 4** dargestellt. Die Zapfwelle als mechanische Eingangsleistung treibt den Generator an, der eine variable dreiphasige Wechselspannung an den ersten Umrichter anlegt. Dieser erzeugt die bereits erwähnte konstante Gleichspannung im Zwischenkreis. In einem zweiten Umrichter wird an den Ausgangsklemmen je nach gewünschtem Modus eine Spannung bereitgestellt. In der Abbildung ist als Beispiel ein Motor skizziert. Aus Sicherheitsgründen ist ein Isolationswächter implementiert, der eigenständig eine mögliche Isolationsverletzung überwacht. Wird eine solche festgestellt, wird über ein Relais an den Eingangsklemmen ein Kurzschluss geschaltet. Im Falle eines Lastabwurfs wird mittels Brems-Chopper der Zwischenkreis an einen Leistungswiderstand gelegt und die Spannung unterhalb eines Maximalbetrags gehalten.

Messungen

Der Zapfwellengenerator wurde mit einem Lastprüfstand vermessen und in einem Feldversuch getestet. In **Abbildung 5** ist der grundsätzliche Ablauf des Hochsetzbetriebs zur Erzeugung der konstanten Zwischenkreisspannung dargestellt, bei dem im Leerlauf der Hochsetzer aktiviert wird (**Abbildung 5, b**). Die Ist-Zwischenkreisspannung (Ch2) folgt dabei dem vorgegebenen geglätteten Sollwert (Ch1). Nach anfänglicher kleiner Regelabweichung pendelt sich der q-Strom (Ch3) ein und hält konstant den Wert, der benötigt wird, um die Zwischenkreisspannung zu stabilisieren. Der gemessene Phasenstromverlauf ist in Grün (Ch4) dargestellt.

Abbildung 5 (a) zeigt eine Lastaufschaltung von etwa einem Drittel der Nennlast. Die bereits erhöhte und auf konstantem Niveau gehaltene Zwischenkreisspannung (Ch3) bricht ein.

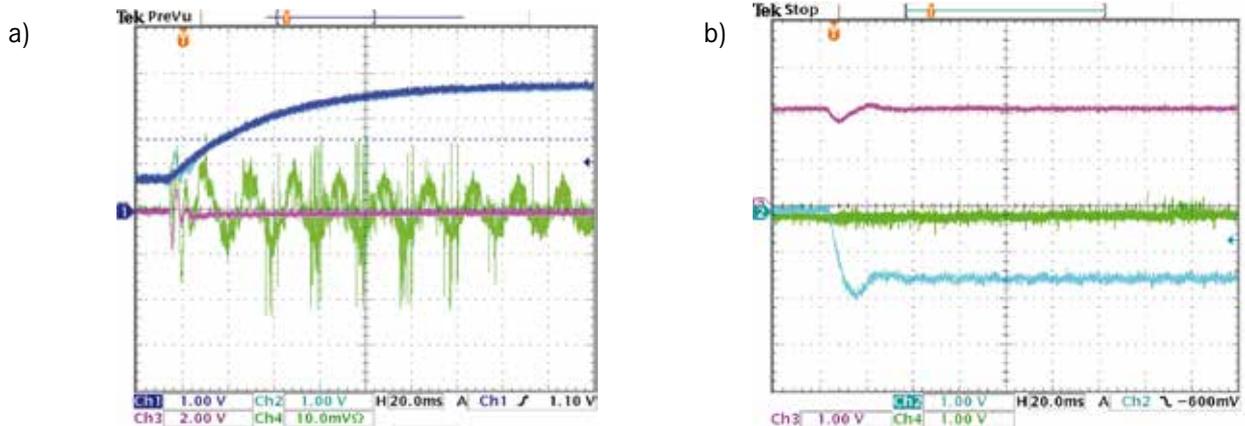
Abb. 4



Leistungsfluss des Zapfwellengenerators mit Brems-Chopper und Isolationswächter

Fig. 4: Power flow of PTO generator with braking chopper and insulation monitor

Abb. 5



Aktivierung des Hochsetzstellers, Ch1–3: 0,5/Div – normierte Darstellung: 2 V entspricht dem Wert 1, Ch4: 10 mV entspricht 5 A (a), Lastaufschaltung im Hochsetzbetrieb, Ch2–4: 0,5/Div – normierte Darstellung: 2 Volt entspricht dem Wert 1 (b)

Fig. 5: Activating step-up chopper, Ch1–3: 0,5/Div – normalized values: 2 volt is 1, Ch4 10 mV equals 5 A (a), applied load, Ch2–4: 0,5/Div – normalized values: 2 V equals 1 (b)

Der Regler reagiert auf diesen Fall und erhöht den negativen q -Strom, um dem entgegenzuwirken (Ch2). In der Folge steigt die Zwischenkreisspannung wieder auf den Sollwert an. Die Dauer der Abweichung liegt bei rund 10 ms. Der d -Strom-Anteil, der nur für die Feldschwächung benötigt wird, bleibt auf null (Ch4).

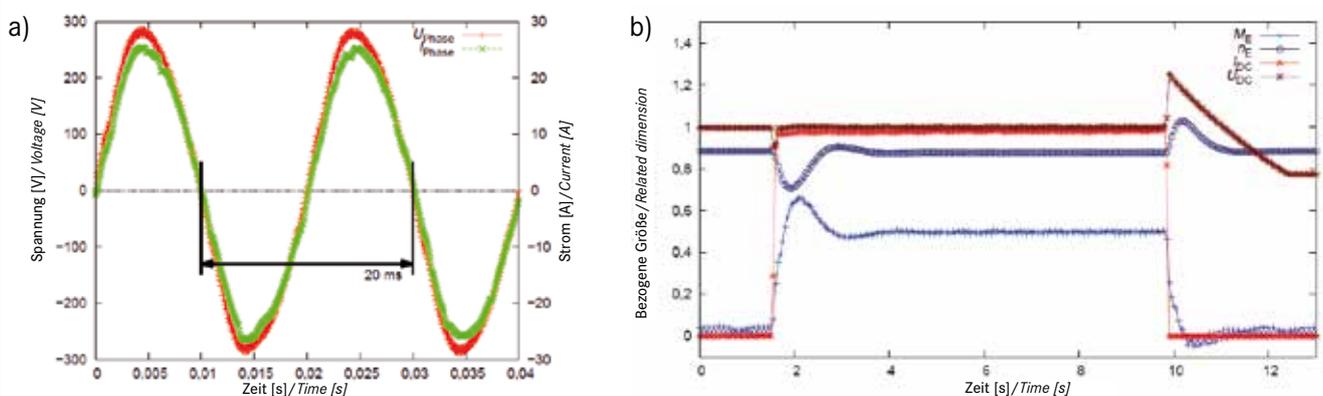
Im Folgenden werden beispielhaft Messungen am Ausgang des Zapfwellengenerators im Netzinselbetrieb dargestellt (**Abbildung 6**). Der Sinusverlauf von Spannung und Strom des 1x230-V-Modus bei Volllast (**Abbildung 6, a**) zeigt, dass alle normativen Anforderungen erfüllt werden, somit externe elektrische Geräte betriebssicher verwendet werden können. Im zeitlichen Verlauf einer Volllastzuschaltung im 3x400-V-Modus (**Abbildung 6, b**) tritt ein geringer Einbruch der Zwischenkreisspannung U_{DC} auf, in der Folge steigt der Zwischenkreisstrom I_{DC} an und der Zapfwelle wird mehr Moment M_E abverlangt.

Es kommt zu einem geringen Drehzahleinbruch n_E . Bei circa 10 Sekunden erfolgt ein Lastabwurf. Dabei wird, zum Beispiel durch einen Fehlerfall, der Leistungsfluss am Ausgang plötzlich unterbrochen. In der Folge steigt die Zwischenkreisspannung über einen Maximalwert und der Brems-Chopper schaltet einen Lastwiderstand an den Zwischenkreis, um die überschüssige Leistung abzuführen. Zur Sicherheit wird der Hochsetzbetrieb deaktiviert und die Zwischenkreisspannung sinkt daraufhin auf den Wert der induzierten Spannung entsprechend der aktuellen Zapfwellendrehzahl.

Neben dem Inselbetrieb wurden noch einige Anbaugeräte getestet:

- Rohrmotor: Spezialanfertigung für einen Mähauflbereiter [7]
- Getriebemotor: für niedrige Drehzahlen wie Schwader [2] oder Grubberwalze
- Getriebeloser Motor: z. B. für Mäher oder Düngestreuer

Abb. 6



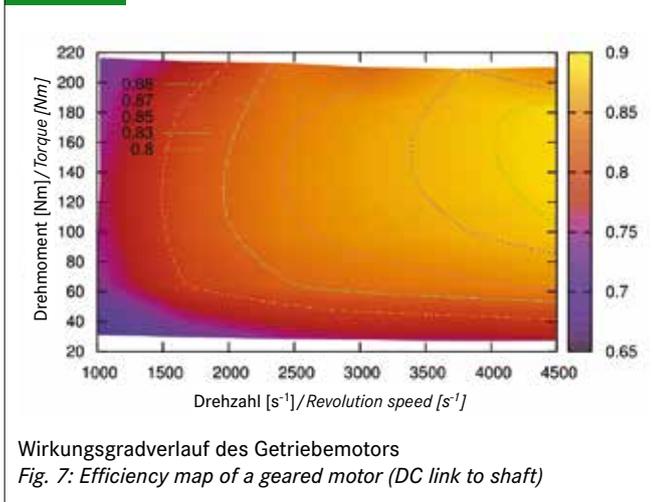
1x230-V-Ausgang: Sinusverlauf bei Nennlast (a),

3x400-V-Ausgang bei Nennlastaufschaltung: Moment (M_E), Drehzahl (n_E) und Zwischenkreisspannung sowie -strom (U_{DC} , I_{DC}) (b)

Fig. 6: 1x230 V output: sinus curve at full load (a),

3x400 V output: characteristics of torque (M_E), revolution speed (n_E) and DC link values (U_{DC} , I_{DC}) at full load (b)

Abb. 7



Die typischen Anforderungen der Anbaugeräte bezüglich der Dynamik kann von den jeweiligen Elektromotoren vollständig erfüllt werden. Zusätzlich wurden die Wirkungsgrade vermessen, um die Effizienz von Elektromotoren im landwirtschaftlichen Einsatz untersuchen zu können. In **Abbildung 7** ist als Beispiel die Muschelkurve eines Getriebemotors dargestellt. Verglichen wurde die Eingangsleistung am Zwischenkreis (ZK) und die abgegebene Leistung an der Welle. In einem sehr großen Drehzahl- und Momentbereich wird ein hoher Wirkungsgrad erreicht, der typisch für Elektromotoren dieser Art ist. Einige weitere gemessene Wirkungsgrade sind [6]:

- Generator: Zapfwelle/3-phasig: 94 %, Zapfwelle/ZK: 92 %
- Motoren: mit Getriebe 88 %, ohne Getriebe 89 % (ZK/Welle), Rohrmotor 95 % (3-phasig/Welle)
- 3x400 V / 1x230 V: 98 % (ZK/ohmscher Widerstand)
- Feldtest: 84 % (Zapfwelle/3-phasig Motorseite)

Alle Messungen am Lastprüfstand sowie im Feldversuch wurden mit einer sensorlosen Rotorlageerfassung der PSM durchgeführt. Im hohen Drehzahlbereich (>15 %) wurde dabei das EMK-Modell (Elektromotorische Kraft, Spannungsmodell) verwendet. Im niedrigen Drehzahlbereich sowie im Stillstand wurde das INFORM-Verfahren (INDirekte Flussermittlung durch On-line Reaktanz-Messung) angewendet [8]. Eine Regelung von Elektroantrieben ohne Positionssensor und Drehzahlmesser ist für landwirtschaftliche Anwendungen wegen der geringeren Kosten und der Wartungsfreiheit unter rauen Einsatzbedingungen von großem Vorteil.

Schlussfolgerungen

Im Vergleich zu vielen anderen Zapfwellengeneratoren die am Markt verfügbar sind, kann die Zwischenkreisspannung durch die Drehzahlunabhängigkeit des Generators über einen sehr großen Bereich konstant gehalten werden. Der Entfall des Getriebes sorgt für eine höhere Ausfallsicherheit und geringere Wartungskosten. Die zur Verfügung gestellten Ausgänge sorgen für eine maximale Flexibilität. Vor allem die Methode zur sensorlosen Regelung einer PSM entspricht dem aktuellen Stand

der Technik. Der vorgestellte Generator kann nicht nur zur stationären Stromversorgung verwendet werden, sondern auch im Feldbetrieb bei voller Fahrt genutzt werden. Mit Dreipunktaufhängung und Steckdosen als Schnittstelle ist eine schnelle und leichte Montage bzw. Demontage möglich.

Literatur

- [1] Karner, J.; Prankl, H.; Kogler, F. (2012): Electric Drives in Agricultural Machinery. CiGR-AgEng 2012 International Conference of Agricultural Engineering, Valencia, Spain, 8.-12.7.2012, http://cigr.ageng2012.org/images/fotosg/tabla_137_C0634.pdf, Zugriff am 26.3.2014
- [2] Prankl, H.; Nadlinger, M.; Demmelmayr, F.; Schrödl, M.; Colle, T.; Kalteis, G. (2010): Mobile Electric Power Supply for Agricultural Machinery and Implements. International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010, 6.-8.9.2010, Clermont-Ferrand, France, p. 265
- [3] Prankl, H.; Nadlinger, M.; Demmelmayr, F.; Schrödl, M.; Colle, T.; Kalteis, G. (2011): Multifunctional PTO Generator for Mobile Electric Power Supply of Agricultural Machinery. VDI-MEG Land.TECHNIK - AgEng 2011, 11.-12.11.2011, Hannover, Germany, pp. 7-13
- [4] Staud, V. (2011): Spezifikation der Steckdose. Vortrag beim Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 5.-6.7.2011, Ifz Francisco Josephinum/BLT Wieselburg, Austria
- [5] Demmelmayr, F.; Eilenberger, A.; Schroedl, M. (2010): Sensorless electric traction drive with 500 Nm outer rotor permanent magnet synchronous machine. International Conference on Electrical Machines (ICEM), 6.-8.9.2010, Rome, Italia, pp. 1-7
- [6] Kogler, F. (2013): Elektrische Antriebe in der Landtechnik, Dissertation, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien
- [7] Kogler, F.; Heissenberger, J.; Schrödl, M.; Hofinger, M.; Karner, J.; Prankl, H.; Kalteis, G.; Prandt-Stritzko, E. (2012): Optimierung einer Mäher-Aufbereiterwelle durch einen elektrischen Antrieb. Landtechnik 67(6), S. 425-428
- [8] Schrödl, M. (1996): Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill based on the "INFORM" Method. 31. IEEE-IAS Meeting, San Diego, USA, Band 1, pp. 270-277

Autoren

DI Dr. Florian Kogler und **DI Johannes Heissenberger** sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe (Leiter: **Prof. Manfred Schrödl**), E-Mail: florian.kogler@tuwien.ac.at

DI Dr. Gerald Kalteis ist als Geschäftsführer der Firma HTD High Tech Drives für die Umrichtertechnologie als Firmenpartner zuständig.

DI Heinrich Prankl ist mit dem Lehr- und Forschungszentrum Josephinum Wieselburg der Konsortialführer des Projekts.

Hinweise

Die Arbeit wurde im Rahmen des COMET-Projekts „Future Farm Technology (FFT)“ der Forschungsförderungsgesellschaft gefördert.

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2013, Hannover, 8.-9. November 2013, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2193, S. 157-162).