

Momentan-Regelung mit Photovoltaik-Wechselrichtern

Eberhard Waffenschmidt

Technische Hochschule Köln

Betzdorferstraße 2, 50679 Köln

+49 221 8275 2020

eberhard.waffenschmidt@th-koeln.de

<https://www.fh-koeln.de/personen/eberhard.waffenschmidt/>

1. Einleitung

Schon jetzt gibt es Stunden, in denen Erneuerbare Energien bis zu 80% der Stromversorgung in Deutschland liefern und schon bald können es 100% werden [1]. Der größte Teil dieser Leistung wird über elektronische Wechselrichter eingespeist, die nicht unmittelbar wie rotierende Generatoren zur Momentan-Regelung beitragen. Noch können die fehlenden Inertia durch Nachbarländer kompensiert werden [2]. In der Zukunft muss die unmittelbare Reaktion auf einen Lastsprung durch Wechselrichter aufgefangen werden [3], im schlimmsten Fall sogar nur durch Photovoltaik (PV). Insbesondere in Inselnetzen, bei denen rotierende Generatoren durch PV ergänzt und ersetzt werden, können Zeiten auftreten, bei denen ausschließlich PV-Anlagen die Versorgung und die Netzregelung und insbesondere die Momentan-Regelung bereitstellen. Dazu existieren Vorschläge, die jedoch aufwändig sind [2]. Daher wird hier als Vorschlag untersucht, die Energie für eine Momentan-Regelung aus Pufferkondensatoren im Zwischenkreis von Wechselrichtern zu entnehmen. Bild 1 zeigt eine exemplarische Schaltungs-Topologie. Diese Arbeit entstand zum Teil im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundprojektes „PV-Diesel“, Förderkennzeichen 0325752E.

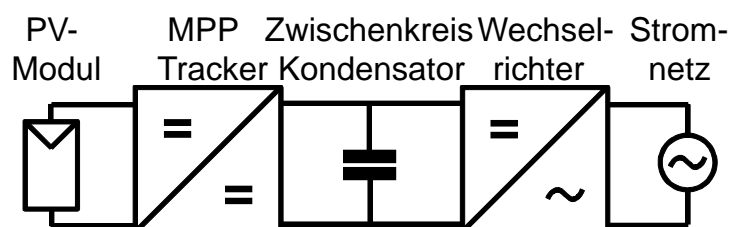


Bild 1: Untersuchte Topologie.

2. Benötigte Energie und Leistung für den Worst Case

Dazu wird hier angenommen, dass nur die Momentan-Regelung als unmittelbare Reaktion auf eine Laständerung berücksichtigt wird, während die folgende Primärregelung durch weitere spezielle Netzteilnehmer erfolgt. Weiterhin wird die Methodologie aus [2] angewandt: Hier wird als Extremfall ein Leistungs-Verlust von 3 GW im ENTSO-E-Netz angenommen, entsprechend 372 MW im deutschen Netz (Bild 2). Unter der Annahme, dass die Primärregelung innerhalb 20 s reagiert [2], werden für die Momentan-Regelung 3720 MWs benötigt. Diese Leistung und Energie müssen im Extremfall allein von allen PV-Wechselrichtern aufgebracht werden können, die dann auch den Maximalbedarf in Deutschland von 80 GW decken müssen. Damit ergibt sich eine zu liefernde Momentan-Leistung von 4,6 W pro installiertem kW, aufgerundet zu 5 W/kW und entsprechend eine Energiemenge von 50 Ws/kW.

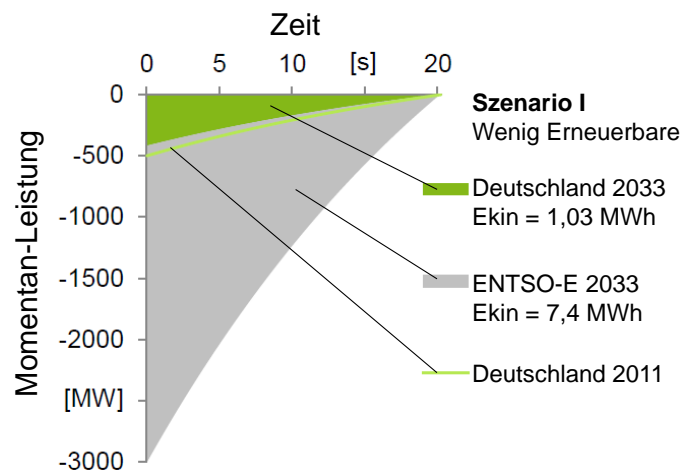


Bild 2: Momentan-Leistungsreserve für den Worst-Case eines Lastsprungs von 3 GW im europäischen ENTSO-E-Netz [2].

Eine zusätzliche Leistung von 5 W/kW im Extremfall entspricht 0,5% der installierten Leistung und sollte für einen Wechselrichter keinen zusätzlichen Aufwand bedeuten. Die Energie von 50 Ws hingegen muss im Zwischenkreiskondensator verfügbar sein. Daher wurde untersucht, welche Kondensatorgröße dazu notwendig ist. Dazu wurden die Kapazität, Nennspannung, Durchmesser und Höhe von 190 Elektrolytkondensatoren von der Website eines Vertriebs für elektronische Komponenten [4] gesammelt. Die daraus berechneten Energieinhalte und Bauvolumen sind in Bild 3 dargestellt. Tatsächlich kann der maximale Energieinhalt E_{max} nur selten genutzt wer-

den, denn ein Kondensator wird typischerweise von der maximalen Spannung U_{max} nur um eine Spannungsdifferenz ΔU entladen. Dies entspricht einer nutzbaren Energie E_{use} von:

$$E_{use} = E_{max} \cdot [1 - (1 - \Delta U / U_{max})^2] \quad (1)$$

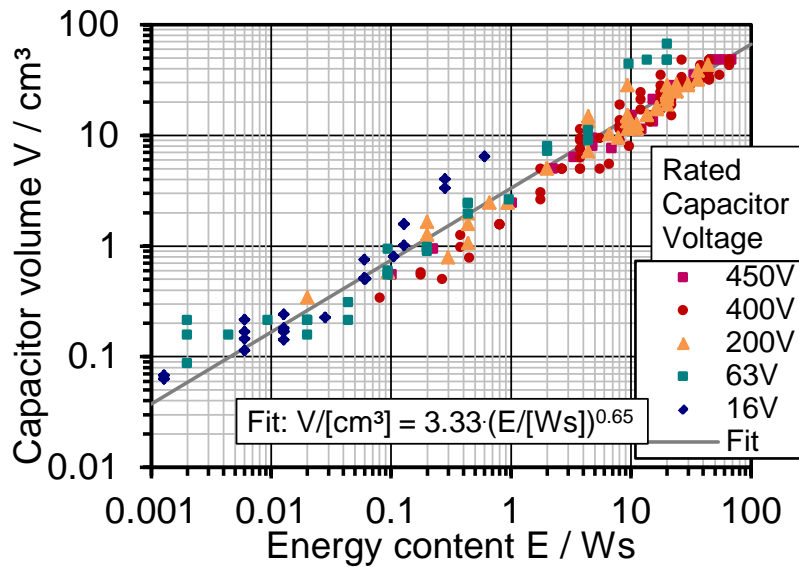


Bild 3: Maximaler Energieinhalt und Baugröße von Elektrolytkondensatoren. Ermittelt aus Daten von [4].

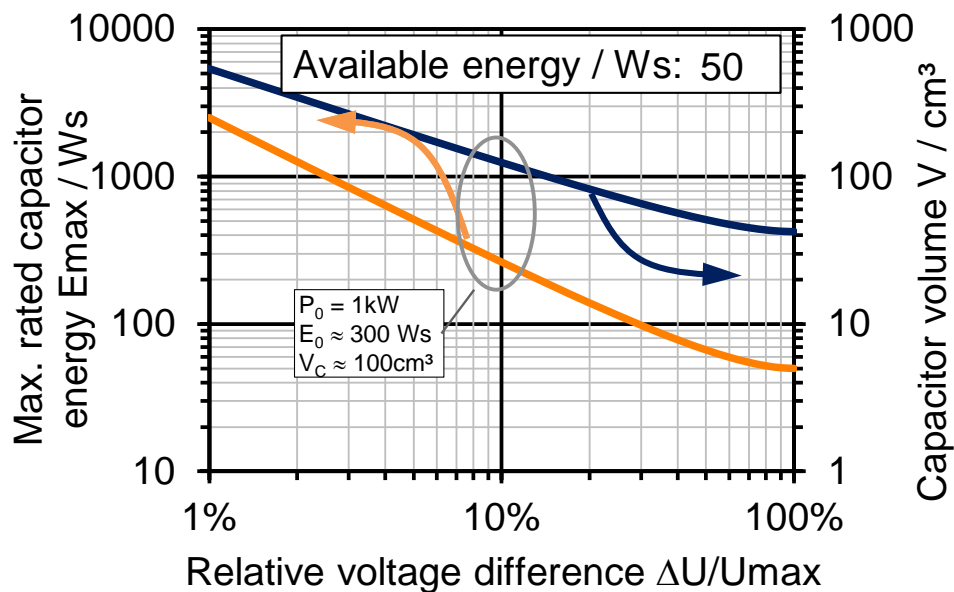


Bild 4: Maximaler Energiegehalt und Baugröße von Elektrolytkondensatoren für eine verfügbare Energiemenge von 50 Ws als Funktion des Spannungs-Rippels am Kondensator.

Diese Gleichung wird verwendet um in Bild 4 zu illustrieren, welcher maximale Energieinhalt E_{max} (orange, helle Kurve) und damit welches Bauvolumen V (blaue, dunkle Kurve) notwendig sind, um 50 Ws zu speichern, wenn nur ein Teil der Spannung ΔU genutzt wird.

Unter der Annahme, dass die Zwischenkreisspannung U_0 im Extremfall um 10% absinken darf, ergibt sich damit ein maximaler Energiegehalt von etwa $E_0 = 300$ Ws (z.B. 3800 μ F/400V), was einer Baugröße von rund 100 cm³ (z.B. Durchmesser 4 cm, Höhe 8 cm) entspricht. Diese Baugrößen liegen in der Größenordnung von üblicherweise verwendeten Zwischenkreiskondensatoren (zumindest bei einphasigen Wechselrichtern).

3. Leistung und Spannung im alltäglichen Betrieb

Im täglichen Betrieb sind die Frequenzfluktuationen, auf die die Momentan-Regelung reagieren muss, wesentlich geringer als im Extremfall.

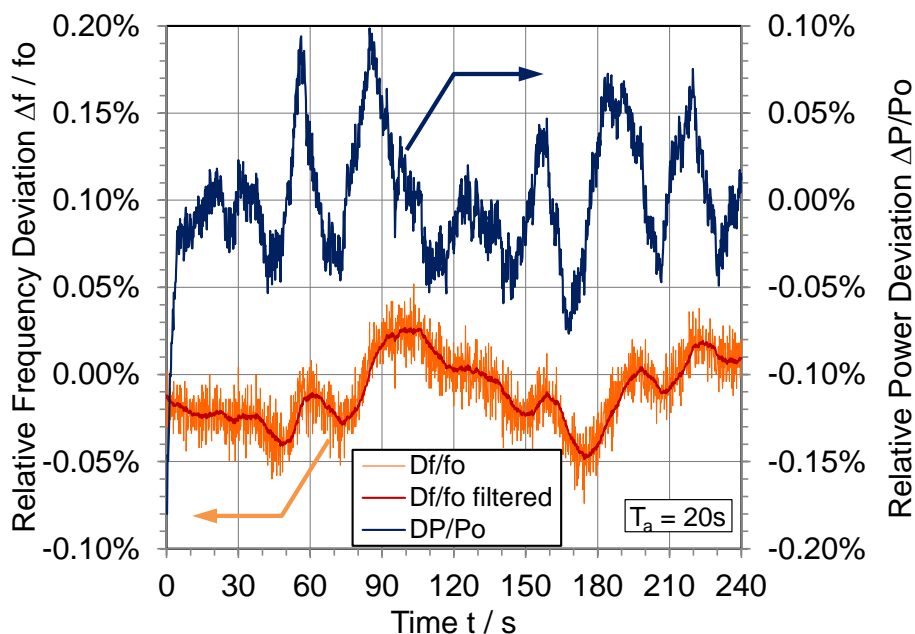


Bild 5: Fluktuation der Netzfrequenz und der Leistung für Momentan-Regelung.

Exemplarisch zeigt Bild 5 die gemessene (orange, hell) und gefilterte (rot, dunkler) Netzfrequenz für einigen Minuten am 8. Feb. 2014. Die Leistung (blau, dunkel), die mit dem Netz ausgetauscht werden muss, ist proportional zur Frequenzänderung df/dt und proportional zur Anlaufzeitkonstante, die hier mit $T_a = 20$ s als typischer Wert

angenommen wird. Sie schwankt zwischen -0,1% und +0,1% der installierten Leistung (auch auf längere Zeitintervalle, hier nicht dargestellt) und kann somit im Vergleich der eingespeisten Leistung P_0 vernachlässigt werden.

Bei einphasigen Wechselrichtern muss im Spannungsnulldurchgang die volle Leistung aus dem Zwischenkreiskondensator zur Verfügung gestellt werden. Demnach ist der Stromripple des Kondensators im Normalbetrieb direkt proportional zur eingespeisten Leistung. Der zusätzliche Anteil des Stromrippels durch die Momentan-Regelung entspricht demnach auch nur +/-0.1%. Zudem ist die Frequenz der Variation viel niedriger als die doppelte Netzfrequenz. Daher ist eine zusätzliche Alterung durch einen erhöhten Ripplestrom unwahrscheinlich.

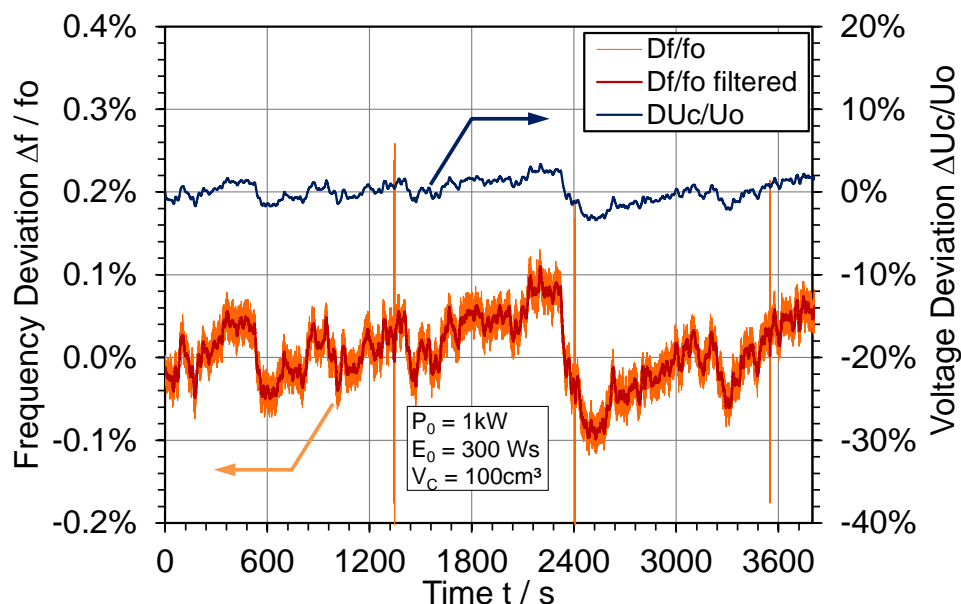


Bild 6: Fluktuation der Netzfrequenz und der Zwischenkreisspannung für Momentan-Regelung.

Die Spannungsvariation am Kondensator ΔU_c ist proportional zum Integral des Stroms und damit näherungsweise der Leistung. Daher gleicht sich die Ableitung der Frequenz df/dt aus und die Spannungsänderung ΔU_c ist proportional zur Netzfrequenzvariation Δf .

$$\frac{\Delta U_c(t)}{U_0} = T^a \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{P_0}{E_0} \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (2)$$

Bild 6 zeigt die Spannungsvariationen (blau, dunkel) für einen Kondensator von 300 Ws maximalem Energieinhalt (siehe oben). Im Normalbetrieb ergibt sich eine Spannungsvariation von $\pm 3.4\%$ der Zwischenkreisspannung. Ein solcher Spannungsripple sollte für Wechselrichter problemlos verkraftbar sein.

4. Fazit

Als Fazit bleibt festzuhalten: Eine Momentan-Regelung mit PV-Wechselrichtern wird bald in Deutschland und Europa notwendig werden. Das benötigt eine zusätzliche Leistung von etwa 5 W und eine Energie von 50 Ws pro installiertem kWpk Solarleistung für einen extremen Störfall. Diese Leistung und Energie könnten aus Zwischenkreiskondensatoren der PV-Wechselrichter zur Verfügung gestellt werden. Im täglichen Betrieb beträgt die Leistungsvariation etwa $\pm 0.1\%$ der installierten Leistung und für einen exemplarischen Fall konnte eine Variation der Zwischenkreisspannung von $\pm 3.4\%$ gezeigt werden.

5. Literatur

- [1] Bodo Giesler, Bruno Burger, "Erneuerbare Energien konkurrieren zunehmend mit Grundlastkraftwerken", Proceedings of the 2. Otti-Konferenz „zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“, 27.-28.Jan. 2015, p. 52-57.
- [2] A.-C. Agricola, et al., „dena-Studie Systemdienstleistungen 2030 - Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Energiesysteme und Energiedienstleistungen, Berlin, Germany, Feb. 2014.
- [3] Pedro Rodriguez, "Control of Grid-Interactive Power Converters: The Synchronous Power Controller", Presentation at ECPE-Workshop "Power Electronics in the Electrical Network", Kassel, Germany, 12. March 2013.
- [4] Conrad-Elektronik, Electrolytic Capacitors, Internet 6.7.2014:
<http://www.conrad.de/ce/de/overview/0245812/>
Elektrolyt-Kondensatoren