

EINFLUSS VON SPANNUNGSÄNDERUNGEN UND ANDEREN QUELLEN AUF NIEDERFREQUENTE STERNPUNKTSTRÖME

Philipp Schachinger^{1*}, Dennis Albert¹, Herwig Renner¹, Georg Achleitner²

¹ Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TU Graz, Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz
+43 (0) 316 873-8054, philipp.schachinger@tugraz.at, iean.tugraz.at

² Austrian Power Grid AG, Wagramer Straße 19, A-1220 Wien, www.apg.at

Kurzfassung: Niederfrequente Ströme in Transformatorsternpunkten führen durch die resultierende Halbzyklussättigung in Transformatoren zu Verlusten und Störungen im elektrischen Energienetz. Hervorgerufen werden diese Ströme vor allem durch Änderungen im Erdmagnetfeld, welche als geomagnetisch induzierte Ströme (GIC) bezeichnet werden. Es können aber auch weitere Effekte gemessen und identifiziert werden, die zu niederfrequenten Strömen führen. Im österreichischen Übertragungsnetz sind mittlerweile neun Sternpunktmessgeräte installiert, welche zur Identifikation von weiteren Quellen genutzt werden. In dieser Arbeit werden zuerst das Messsystem und bereits bekannte Quellen beschrieben, bevor gezeigt wird, dass regelmäßige Schalthandlungen zur Spannungsanpassung im Höchstspannungsnetz zu Sternpunktströmen führen.

Keywords: Niederfrequente Sternpunktströme, Spannungsänderungen

1 Niederfrequente Sternpunktströme

Niederfrequente Sternpunktströme (engl: low frequency currents, LFC) können in Energieübertragungsnetzen zu schweren Störungen führen. Der Einfluss reicht von erhöhten Betriebsgeräuschen von Transformatoren, über erhöhten Blindleistungsbedarf und Spannungsverzerrungen bis hin zu Blackouts. Diese niederfrequenten Sternpunktströme, oft als DC oder Quasi-DC bezeichnet, können aufgrund ihrer Frequenzanteile in zwei Kategorien eingeteilt werden [1]: Ströme mit einer Frequenz zwischen 0,01 mHz bis zu 1 mHz werden durch Änderungen des Erdmagnetfelds hervorgerufen und als geomagnetisch induzierte Ströme (GICs) bezeichnet. Die Anteile der niederfrequenten Ströme mit Frequenzen zwischen 1 mHz und 1 Hz werden typischerweise durch andere Effekte bzw. von Menschen verursacht.

Ausgelöst durch erhöhte Geräuschpegel an Transformatoren werden seit 2016 an mittlerweile neun Transformatoren im APG Netz die Sternpunktströme mit einem eigens dafür entwickeltem Messsystem gemessen. Die Ergebnisse werden für die Verifikation der GIC-Simulationsrechnung [2] und der Identifikation von andere LFC-Quellen genutzt.

2 Sternpunktmessungen

Die kontinuierliche Messung von Transformator-Neutralpunktströmen in Österreich begann 2016. Derzeit sind neun Messsysteme in Betrieb, die im österreichischen Hochspannungsnetz die Sternpunktströme von Transformatoren im Übertragungsnetz erfassen [3]. Diese flächendeckende Messung ermöglicht es, sowohl lokale als auch globale LFC-Quellen zu identifizieren. In 1 ist das österreichische Höchstspannungsnetz mit den Messstationen

dargestellt. In dieser Arbeit werden nur die Messpunkte #01 und #03 verwendet, im Folgenden mit NP 1 und NP 3 bezeichnet.

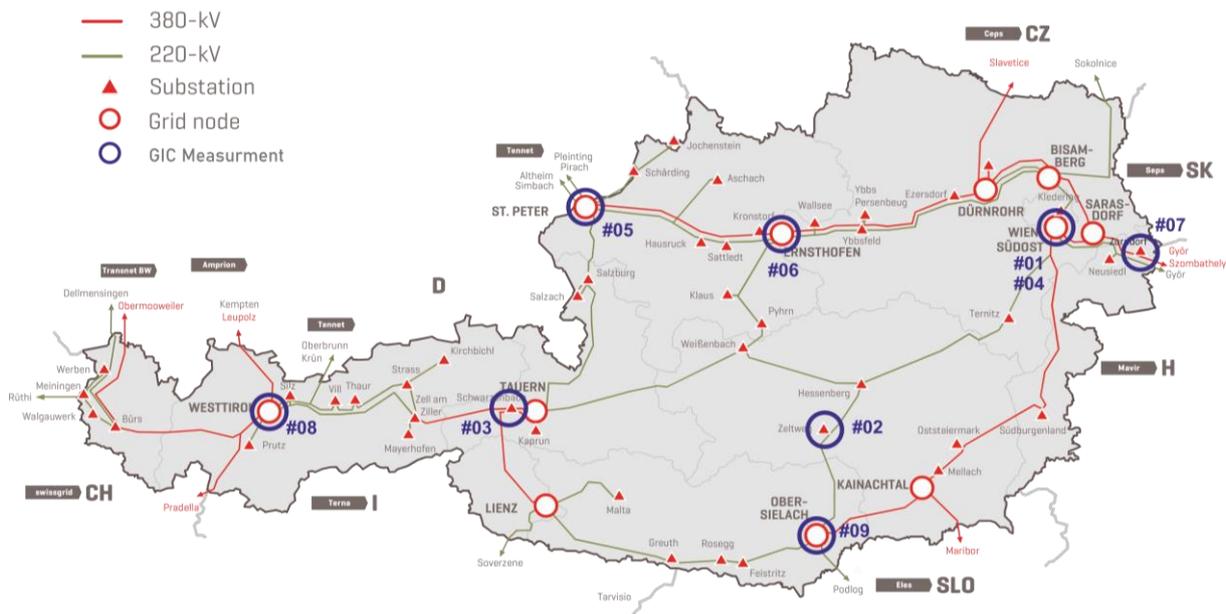


Abbildung 1: Österreichisches Übertragungsnetz mit Sternpunktmessstationen

Die Messsysteme verwenden eine mobile Erdungsgarnitur, um den Sternpunkt starr mit der Erde zu verbinden und den Sternpunktserder zu überbrücken [4]. Der flexible Leiter wird durch einen Nullfluss-Stromwandler geführt. Das Messsignal wird mit einer Grenzfrequenz von 0,7 Hz tiefpassgefiltert, um die 50-Hz-Netzfrequenzkomponenten zu filtern. Dadurch wird eine niedrige Abtastrate von 1 Hz erlaubt und ermöglicht die Verwendung eines kostengünstigen Einplatinencomputers für die Datenerfassung. Der Strommessbereich beträgt ± 25 A mit einer Genauigkeit von $2\% \pm 1$ mA. Die Messdaten werden automatisiert an einen Server zur Archivierung und weiteren Analyse übertragen.

3 Quellenanalyse

3.1 Geomagnetisch induzierte Ströme

GICs sind die Folge von Veränderungen im Erdmagnetfeld. Diese Veränderungen treten z. B. auf, wenn Wolken geladener Teilchen von der Sonne, verursacht durch koronale Massenauswürfe, auf die Erde treffen und das Erdmagnetfeld verformen. Nach dem Faradayschen Induktionsgesetz führt dies zu einem induzierten elektrischen Feld im leitfähigen Erdboden. Weit ausgedehnte Infrastruktur wie Pipelines oder geerdete Hochspannungsnetze bieten einen niederohmigen Pfad für Ströme, die aus der elektromotorischen Kraft (emf) resultieren. Das Frequenzspektrum von GICs kann in schwache und starke geomagnetische Aktivität unterteilt werden, liegt aber in der Regel unter 1 mHz [1].

Erhöhte GICs treten vor allem rund um solare Maxima auf, welche einen 11-Jahres Zyklus folgen. Das nächste Maximum des aktuellen Zyklus 25 ist 2025 zu erwarten, trotzdem führte ein Sonnensturm am 12. Mai 2021 bereits gemessenen Strömen von bis zu 13,8 A im Sternpunkt.

Eine Möglichkeit GICs zu berechnen, besteht darin, das geomagnetische Feld, welches von Observatorien wie z.B. dem Conrad Observatorium bei Wien gemessen wird, als ebene Welle die in die Erde eindringt, anzunehmen [5]. Mit Hilfe von Erdschichtmodellen kann ein resultierendes elektrisches Feld über ein Gebiet berechnet werden. Dieses elektrische Feld kann durch Spannungsquellen zwischen geerdeten Transformatorsternpunkten beschrieben werden, die zu Strömen im Hochspannungsnetz führen.

Der Vergleich der Zeitreihen von berechneten GICs und gemessenen Sternpunktströmen führt zu hohen Korrelationen, allerdings unterscheiden sich die Frequenzkomponenten, da auch andere niederfrequente Ströme als GICs gemessen werden [1]. Diese anderen Ströme haben je nach Messpunkt andere Spektren, zeigen jedoch oftmals Periodendauern von 60 min, 30 min, 15 min und weniger.

3.2 Öffentlicher Nahverkehr

Öffentliche Verkehrsmittel als LFC-Quelle wurden erstmals in [6] durch die Analyse von wiederkehrenden Mustern identifiziert, die mit den Betriebszeiten der Wiener U-Bahn, welche ein Gleichstromversorgungssystem aufweist, korrelieren.

Aufgrund der Einschränkungen durch Covid-19 kann diese Hypothese nun bestätigt werden: Die Berechnung eines 5-Minuten-Effektivwertes der gemessenen Sternpunktströme in Abbildung 2 a) zeigt, dass die Sternpunktströme in der Nacht mit Ausnahme der Wochenendnächte deutlich abfallen. In den Wochenendnächten bleibt die Wiener U-Bahn mit einer reduzierten Anzahl von Zügen in Betrieb, daher sind immer noch Ableitströme in den nahegelegenen Hochspannungstransformatorsternpunkten zu messen. Aufgrund der Covid-19-Beschränkungen stellte die U-Bahn jedoch auch den Betrieb in den Wochenendnächten während des Beobachtungszeitraums ein, weshalb die Stromschwankungen im Transformatorsternpunkt ebenfalls abnahmen. Abbildung 2 zeigt den Vergleich von zwei Wochen, a) eine normale Woche und b) eine Woche nach den geänderten Betriebszeiten. Die RMS-Berechnung zeigt dieses Verhalten deutlicher als die unverarbeiteten Messdaten.

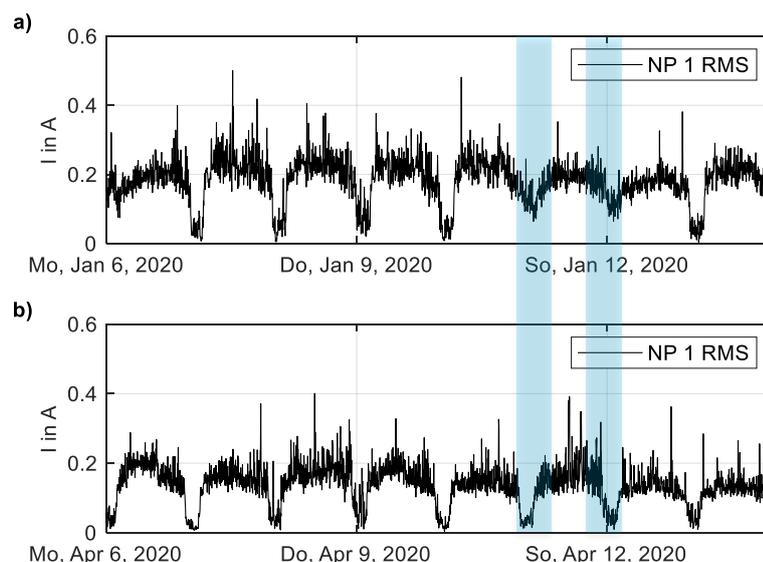


Abbildung 2: RMS Sternpunktströme nahe Wien für 2 Wochen: a) Normale Woche mit U-Bahn Betrieb in den Wochenendnächten, b) U-Bahn Betrieb wegen Covid-19 Maßnahmen auch in den Wochenendnächten eingestellt

3.3 Spannungsänderungen

Die Netzfrequenz von 50 Hz im kontinental-europäischen Verbundnetz weist alle 15, 30, 45 und 60 Minuten Spitzen bzw. Einbrüche auf. Dies ist auf die Handelsintervalle auf dem Energiemarkt zurückzuführen [7, 8]. Die Änderungen der Netzfrequenz und weiteren Effekten durch Fahrplanänderungen bei Kraftwerken, müssen durch Regelungsmechanismen kompensiert werden. Dieses Verhalten lässt sich am besten erkennen, wenn man für jeden Zeitschritt eines untersuchten Zeitintervalls einen Mittelwert berechnet. Hierzu wird zu jedem Zeitpunkt eines 24 Stundenintervalls der Mittelwert aus den Messdaten mehrerer Tage zu diesem Zeitpunkt berechnet. In Abbildung 3 ist diese Berechnung für die Netzfrequenz und zwei Spannungsmessungen über einen Mittelungszeitraum von 30 Tagen dargestellt.

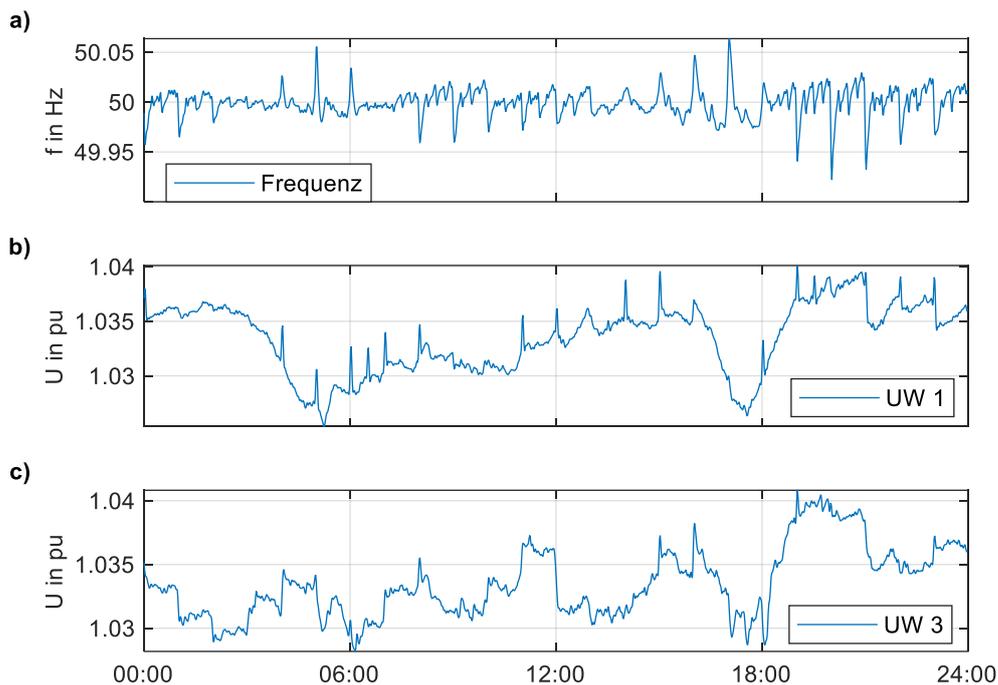


Abbildung 3: Minütliche Mittelwerte eines Tagesverlaufes für a) Netzfrequenz, b) Spannung im Umspannwerk 1 (UW 1), c) Spannung im Umspannwerk 3 (UW 3)

Diese Umspannwerke entsprechen den oben erwähnten Transformatorsternpunkten 1 und 3. Durch die Mittelwertberechnung werden Sonderfälle, welche nicht täglich auftreten, gefiltert. In den Spannungen sind ebenfalls wiederkehrende Spitzen und Änderungen erkennbar, wenn auch nicht mit der gleichen Häufigkeit wie in der Netzfrequenz.

Die Berechnung der mittleren Sternpunktströme in Abbildung 4 zeigt neben einer langsamen Änderung, welche durch die Erdrotation hervorgerufen wird, überlagerte Ströme mit unterschiedlichen Frequenzanteilen.

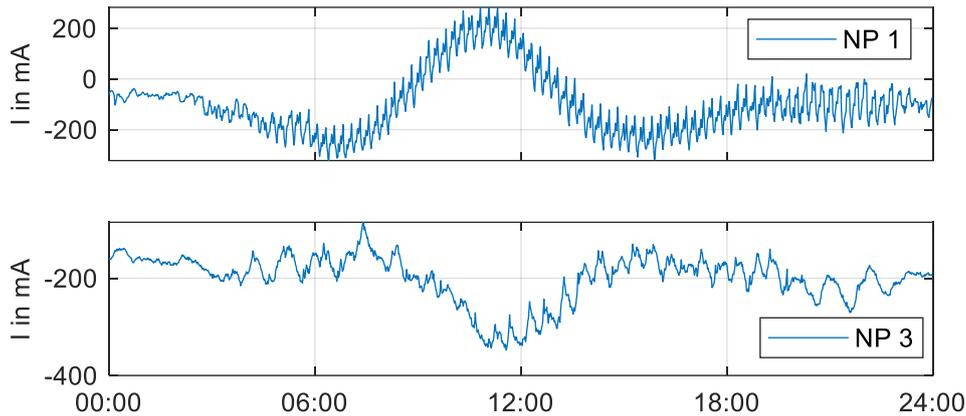


Abbildung 4: Minütlicher Mittelwert eines Tagesverlaufes von den Sternpunktmessungen NP 1 und NP 2

Eine Analyse der Netzfrequenz, der Spannungen in den zwei Umspannwerken sowie der zwei Sternpunktmessungen im Frequenzbereich in Abbildung 5 zeigt, dass Frequenzanteile die in den Phasor Measurement Unit (PMU) Daten hervortreten ebenfalls in den Sternpunktmessungen auffallen. In Abbildung 5, welche einen Ausschnitt des Frequenzspektrums der Messdaten zeigt, ist hierzu der Bereich um 60, 30 und 15 Minuten markiert. Im Umspannwerk 1 sind diese Frequenzanteile deutlich ausgeprägter als in Umspannwerk 3. Die zugehörigen Sternpunkte zeigen ähnliche Spektren, so ist die 15 Minuten Komponente in UW 1 und NP 1 deutlich zu erkennen.

Da nur Quellen analysiert werden, welche sich außerhalb des GIC-Frequenzbereichs befinden, wurden die berechneten Mittelwerte der Sternpunktströme und Spannungen Hochpassgefiltert, bevor eine Autokorrelationsfunktion angewendet wurde. Abbildung 6 a) zeigt die Autokorrelation der Sternpunktströme: NP 1 zeigt eine hohe Autokorrelation im Abstand von 15 Minuten, wie es sich bereits im Frequenzspektrum abgezeichnet hat. Die zugehörige Autokorrelation der Spannung von UW 1 in Abbildung 6 b) zeigt diesen 15 minütlichen Rhythmus nicht, sondern Spitzen bei 30 und 60 Minuten.

NP 3 in Abbildung 6 a) zeigt Spitzen in der Autokorrelation ebenso wie UW 3 nach 30 und 60 Minuten, obwohl das Frequenzspektrum von UW 3 in Abbildung 5 keine erhöhten Komponenten mit diesen Perioden aufweist. Dies lässt darauf schließen, dass es wiederkehrende Spannungsänderungen gibt, welche aber nicht genau im 60-Minuten Rhythmus auftreten, sondern nur ca. jede Stunde passieren. Dadurch zeigt das Spektrum keine Spitzen in diesem Bereich.

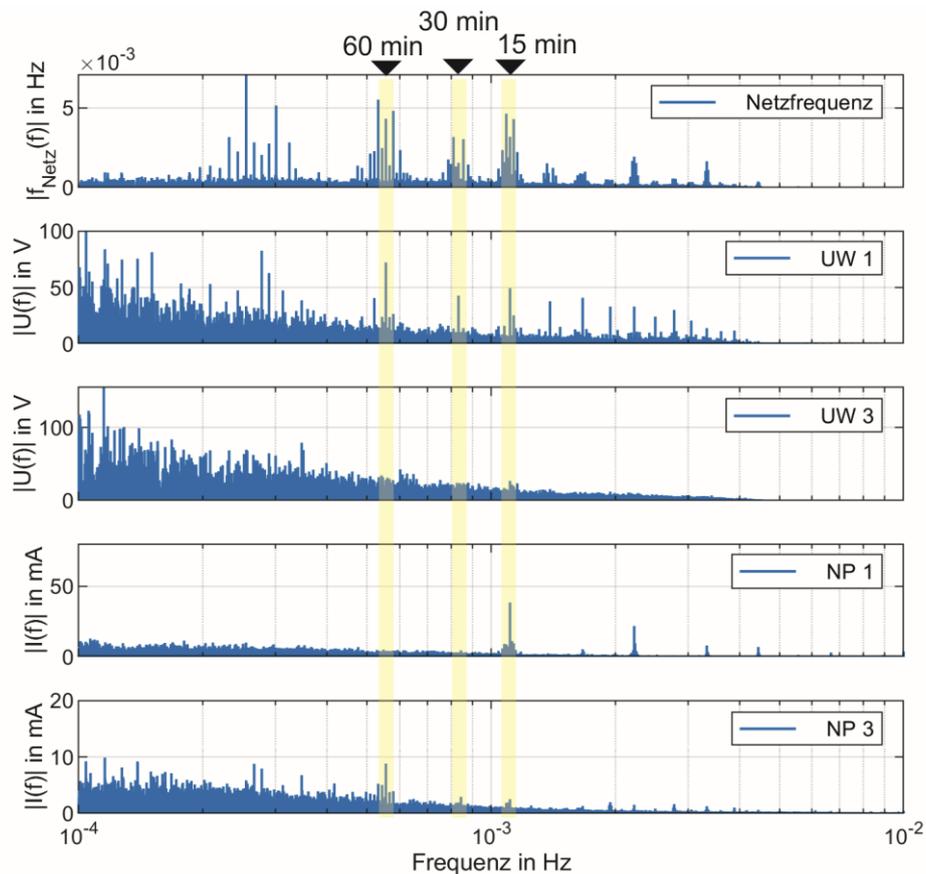


Abbildung 5: Ausschnitt aus den Frequenzspektren der Netzfrequenz, Spannungen in UW 1 und UW 3 sowie den Sternpunktströmen NP 1 und NP 3

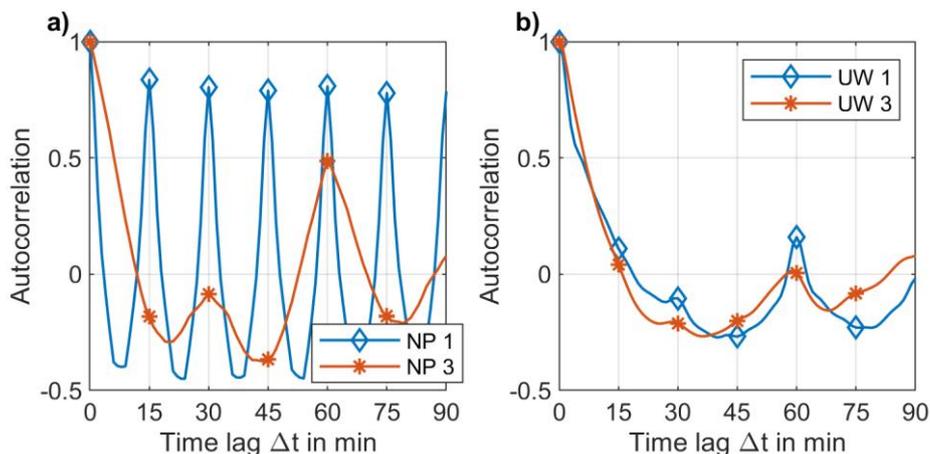


Abbildung 6: Autokorrelationsfunktion für a) Sternpunktströme NP 1 und NP 3, b) Spannungen in UW 1 und UW 3

Betrachtet man die mittlere Netzfrequenz in Abbildung 3 a), so erkennt man die höchsten Spitzen zur vollen Stunde, was mit den Day-Ahead-Handelsintervallen korreliert, die niedrigeren, aber häufigeren Spitzenwerte resultieren aus dem Intraday-Handel. Die durchgeführten Autokorrelationen der Sternpunktströme und Spannungen weisen ebenfalls auf einen Einfluss der genannten Handelszeiten hin.

Um den Zusammenhang zwischen Sternpunktmessungen und sich wiederholenden Änderungen in den Spannungen weiter zu untersuchen, wurden die zeitlichen Verläufe der der Spannung in UW 3 und der Sternpunktstrom NP 3 zu vollen Stunden verglichen.

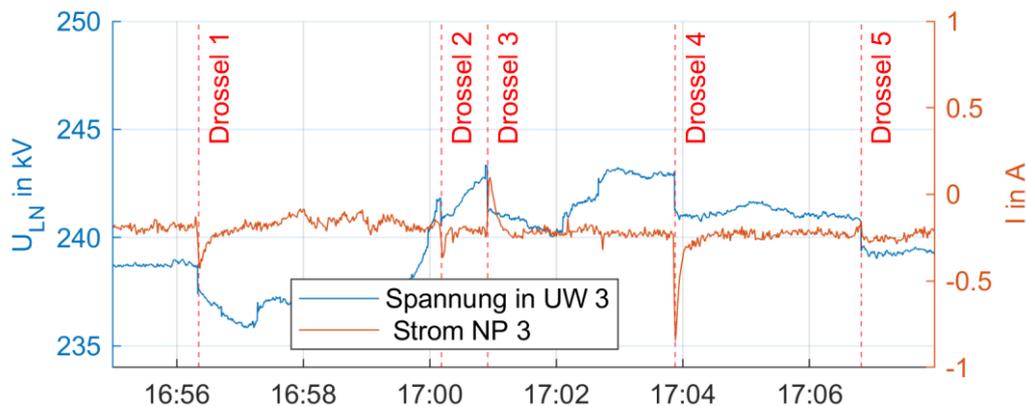


Abbildung 7: Zeitverläufe zur vollen Stunde mit Zuschaltzeitpunkten von Kompensationsdrosseln

Abbildung 7 zeigt einen typischen Verlauf der Spannung und des Sternpunktstromes für Abendstunden im Bereich von UW 3. Besonders in diesem Zeitraum, ebenso wie am Morgen, werden häufig Kompensationsspulen geschaltet, um die Blindleistung in diesem Bereich zu regeln. Die eingezeichneten fünf Drosseln sind über mehrere Umspannwerke in diesem Bereich verteilt. Diese Schaltungen werden nicht automatisiert durchgeführt und erstrecken sich über mehrere Minuten. Dies erklärt unter anderem, warum die Frequenzanalyse in Abbildung 5 nicht einzelne Spitzen zeigt, sondern ein Bereich rund um die Handelszeiten in der Autokorrelation hervortritt.

Es ist erwähnenswert, dass die geomagnetischen Feldmessungen, die für die GIC-Berechnung verwendet werden, auch von Quellen mit Zyklen von 15 Minuten und weniger beeinflusst werden, was nicht durch geophysikalische Effekte erklärt werden kann [9]. Die geomagnetischen Feldmessungen, die für die GIC-Berechnungen verwendet werden, werden am Conrad-Observatorium durchgeführt, das südwestlich von NP 1 liegt. Es wird angenommen, dass Streuströme, wie oben erläutert, im Erdungssystem des Conrad-Observatoriums zirkulieren und möglicherweise die geomagnetische Feldmessung beeinflussen. Weitere Untersuchungen zum Nachweis dieser Hypothese sind jedoch erforderlich.

4 Zusammenfassung

Niederfrequente Sternpunktströme setzen sich aus Strömen aus unterschiedlichen Quellen mit verschiedenen Frequenzen zusammen. Die größten Ströme werden durch Sonnenstürme und den resultierenden Änderungen im Erdmagnetfeld verursacht.

Eine weitere bereits bekannte Quelle für niederfrequente Sternpunktströme konnte durch Sonderfälle bestätigt werden: Ableitströme aus DC-Bahnsystemen schließen sich über das Höchstspannungsnetz und verursachen dabei Sternpunktströme. Änderungen der Betriebszeiten und die daraus resultierenden Änderungen im Sternpunktstrommuster zeigen diesen Zusammenhang.

Ausgehend von ähnlichen Frequenzspektren von Netzfrequenz, Spannungen und Sternpunktströmen wurden in dieser Arbeit Anpassungen der Spannung als weitere Quelle für niederfrequente Sternpunktströme identifiziert. Indirekt hervorgerufen durch Änderungen im Kraftwerkeinsatz und daraus resultierenden Spannungsänderungen, teilweise durch den Handel am Energiemarkt ausgelöst, werden Kompensationsspulen zu und weggeschaltet, was zu Sternpunktströmen in nahen Transformatoren führt. Dies konnte für einen Messpunkt durch Protokolle der Drosselschaltungen dargelegt werden.

Die Frage, warum die Autokorrelation in NP 1 ein so stark ausgeprägtes 15-Minuten Muster aufweist, die zugehörigen Spannungen jedoch nicht, konnte bislang noch nicht vollständig geklärt werden.

Weiters sind auch Störungen im 15-min Intervall im Conrad Observatorium auffällig, welche nicht geomagnetischen Ursprungs sind. Ein Zusammenhang mit den Sternpunktmessungen bedarf noch weiterer Untersuchungen.

Für die weiteren Sternpunktmessungen müssen die Analysen der Schaltheftungen im jeweiligen Netzgebiet noch durchgeführt werden. Da sich mehrere Messungen in Grenznahen Umspannwerken befinden, würden dazu auch Daten aus angrenzenden Höchstspannungsnetzen benötigt werden.

5 References

- [1] D. Albert, P. Schachinger, H. Renner, P. Hamberger, F. Klammler, and G. Achleitner, "Field experience of small quasi DC bias on power transformers A first classification of low-frequency current pattern and identification of sources," in *Cigre Session 48*, Paris, 2020.
- [2] P. Schachinger and D. Albert, *LFC Simulator*. Institute of Electrical Power Systems, 2021. Accessed: Aug. 17 2021. [Online]. Available: https://github.com/P-Schachinger/LFC_simulator
- [3] D. Albert, P. Schachinger, R. L. Bailey, H. Renner, and G. Achleitner, "Analysis of long-term GIC measurements in transformers in Austria," *Space Weather*, 2021, doi: 10.1029/2021SW002912.
- [4] D. Albert, T. Halbedl, H. Renner, R. L. Bailey, and G. Achleitner, "Geomagnetically induced currents and space weather - A review of current and future research in Austria," in *2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC): Proceedings : 3-6 September 2019, Bucharest, Romania*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1–6. Accessed: Jun. 6 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8893515>
- [5] R. Pirjola, "Electromagnetic induction in the earth by a plane wave or by fields of line currents harmonic in time and space," Phd Thesis, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, 1982. [Online]. Available: <https://books.google.at/books?id=s33DwQEACAAJ>
- [6] T. Halbedl, "Low Frequency Neutral Point Currents on Transformer in the Austrian power Transmission Network," Phd Thesis, Institute of Electrical Power Systems, Graz University of Technology, Graz, 2019. Accessed: Nov. 11 2021. [Online]. Available: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=5cc8220f5d096&location=browse>

- [7] B. Schäfer, M. Timme, and D. Witthaut, "Isolating the Impact of Trading on Grid Frequency Fluctuations," in *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2018, pp. 1–5.
- [8] B. Schäfer, C. Beck, K. Aihara, D. Witthaut, and M. Timme, "Non-Gaussian power grid frequency fluctuations characterized by Lévy-stable laws and superstatistics," *Nat Energy*, no. 3, pp. 119–126, 2018, doi: 10.1038/s41560-017-0058-z.
- [9] P. Arneitz, N. Kompein, R. Egli, and R. Leonhard, "Peculiarities from the frequency analysis of geomagnetic data at COBS," in vol. 6, *COBS Journal: Scientific Contributions 2019-2020*, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Ed., 2020, p. 10.