

NIEDERFREQUENTE STERNPUNKTSTRÖME IM ÜBERTRAGUNGSNETZ – EIN ÜBERBLICK ÜBER AKTUELLE UND ZUKÜNFTIGE FORSCHUNG IN ÖSTERREICH

Philipp SCHACHINGER^{1*}, Dennis ALBERT¹, Herwig RENNER¹,
Rachel L. BAILEY², Georg ACHLEITNER³, Gerald LEBER⁴

¹ Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TU Graz, Inffeldgasse 18, +43 316 873 8054,
philipp.schachinger@tugraz.at, www.iean.tugraz.at

² Institut für Weltraumforschung, rachel.bailey@oeaw.ac.at, www.iwf.oeaw.ac.at

³ Austrian Power Grid AG, Wien, georg.achleitner@apg.at, www.apg.at

⁴ Siemens AG, Elingasse 3, 8160 Weiz, www.siemens.at

Kurzfassung:

Leitfähige geerdete elektrische Energieübertragungsnetze bieten einen niederohmigen Pfad für im Boden induzierte Ströme. Regionen in hohen Breitengraden oder solche mit geringer Erdleitfähigkeit sind besonders von geomagnetisch induzierten Strömen (GICs) betroffen, die durch Weltraumwetterereignisse verursacht werden können. Induzierte Ströme können zu Schäden an Anlagen oder Systemausfällen führen. Da Österreich als Teil der europäischen Alpen mit gering leitfähigen Gebieten tendenziell ein höheres Risiko für induzierte Ströme im elektrischen Energieübertragungsnetz hat, wird der Einfluss des Weltraumwetters auf das Stromnetz untersucht. Zwei unabhängige Modelle zu GICs in Österreich wurden erarbeitet und durch Vergleich mit laufenden Transformatorsternpunktmessungen verifiziert. Weitere Forschungsfelder, wie Weltraumwettervorhersage, Leistungstransformatoren unter Einfluss niederfrequenter Ströme und Gegenmaßnahmen für den Systembetrieb werden aufgezeigt.

Keywords: Übertragungsnetze, Sternpunktströme, GIC, LFC, Leistungstransformatoren

1 Einleitung

Geomagnetische Variationen des Magnetfeldes durch Weltraumwetter können Ströme im Erdboden induzieren. Leitfähige geerdete verbundene Infrastruktur mit einer geografisch weiten Ausdehnung, wie beispielsweise das elektrische Energieübertragungsnetz, bieten niederohmige Wege für induzierte Ströme, die zu Ausfällen oder Schäden im Netz führen können [1, 2]. Ein bekanntes Beispiel der Auswirkungen von GIC ist das neun stündige Hydro-Quebec Blackout im März 1989 [3]. Der massive Sonnensturm („Halloween Storm“) vom Oktober und November 2003 führte zu mehreren Problemen: Flüge in höheren Breitengraden wurden wegen gesundheitlicher Bedenken bezüglich erhöhter Strahlungswerte und Kommunikationsausfällen umgeleitet [4]. Des Weiteren führte dieser Sturm zu einem Blackout in Malmö, Schweden, bei dem 50.000 Menschen betroffen waren [5].

Um die Auswirkungen auf das Energieübertragungsnetz besser zu verstehen, wurden Simulationen und Messungen im In- und Ausland durchgeführt. An der TU Graz und der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) wurden zwei unabhängige GIC-Simulationsmodelle erstellt und mit Transformatorsternpunktmessungen im österreichischen Stromübertragungsnetz verglichen. In Kooperation mit der APG und Siemens AG Österreich führt das Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN) die Forschung im Bereich der Leistungstransformatoren und Energienetze fort.

2 Weltraumwetter

Das Erdmagnetfeld wird durch ein inneres und äußeres Magnetfeld gebildet. Der innere Teil wird durch den Erdkern gebildet, während das äußere Magnetfeld durch das Weltraumwetter beeinflusst wird. Das äußere Magnetfeld dominiert die Magnetosphäre, in welchem mehrere Stromsysteme interagieren und den äußeren magnetischen Teil des Erdfeldes bilden [6]. Die verschiedenen Stromsysteme werden unter anderem vom umgebenden Sonnenwind beeinflusst. Energiereiche Eruptionen auf der Sonnenoberfläche, die sich im interplanetaren Raum ausbreiten, werden als koronale Massenauswürfe (coronal mass ejections, CME) oder Sonnenstürme bezeichnet. Deren Häufigkeit korreliert mit dem elf Jahre dauernden Sonnenzyklus, wobei das nächste Maximum im Jahr 2024 erwarten wird. Ein Überblick über die Stromsysteme in der Magnetosphäre ist in [7] zu finden.

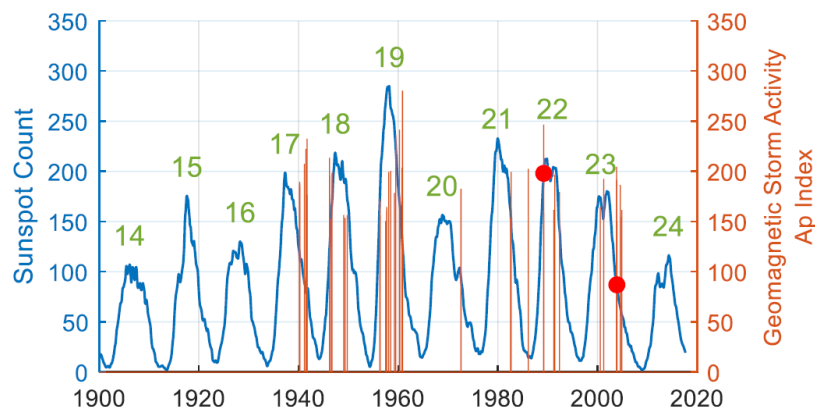


Abbildung 1: Sonnenzyklus, Quebec und Malmö Blackouts markiert [8]

Waren vor allem in Regionen in höheren Breitengraden diese Sonnenaktivitäten und die daraus resultierenden Probleme aufgrund der geographischen Lage bereits seit langem bekannt, wurde in mittleren Breitengraden (Zentral Europa, Zentral USA, Brasilien, etc.) mit der Untersuchung der Auswirkungen erst später begonnen [9, 10].

2.1 Vorhersagen

Um möglichen Problemen von Sonnenstürmen entgegenzuwirken, wurden verschiedene Vorhersagemodelle auf Basis von vorwiegend zwei Methoden entwickelt: Auswertung von Sonnenbildern in Modellen um CME Ausbreitungen vorherzusagen und Messungen von Sonnenwindmessungen durch Satelliten am Lagrangepunkt L1 [11–14].

Im Moment läuft in Österreich eine Studie um die Vorwarnzeit von geomagnetischen Stürmen zu verbessern (PREDSTORM). In diesem soll mit Machine Learning Methoden eine umfassende Vorhersage des Weltraumwetters erzielt werden.

3 Modellierung, Simulation und Analyse von GIC

3.1 Simulation

Zwei unabhängige Modelle zur Simulation von GICs im österreichischen Stromübertragungsnetz wurden von der ZAMG [15] und der TU Graz [8] entwickelt und untersucht.

Das am IEAN verwendete Modell verarbeitet neben Magnetfelddaten vom Conrad Observatorium und Erdschichtmodellen die Daten des österreichischen Übertragungsnetzes und erzielt dabei sehr gute Korrelationen zwischen Simulation und Messung [8]. Aus diesem Modell wurde eine Sensitivitätsanalyse für alle Umspannwerke der APG abgeleitet und weitere GIC interessante Standorte für LFC (engl. Low Frequency Currents) Messsysteme ermittelt.

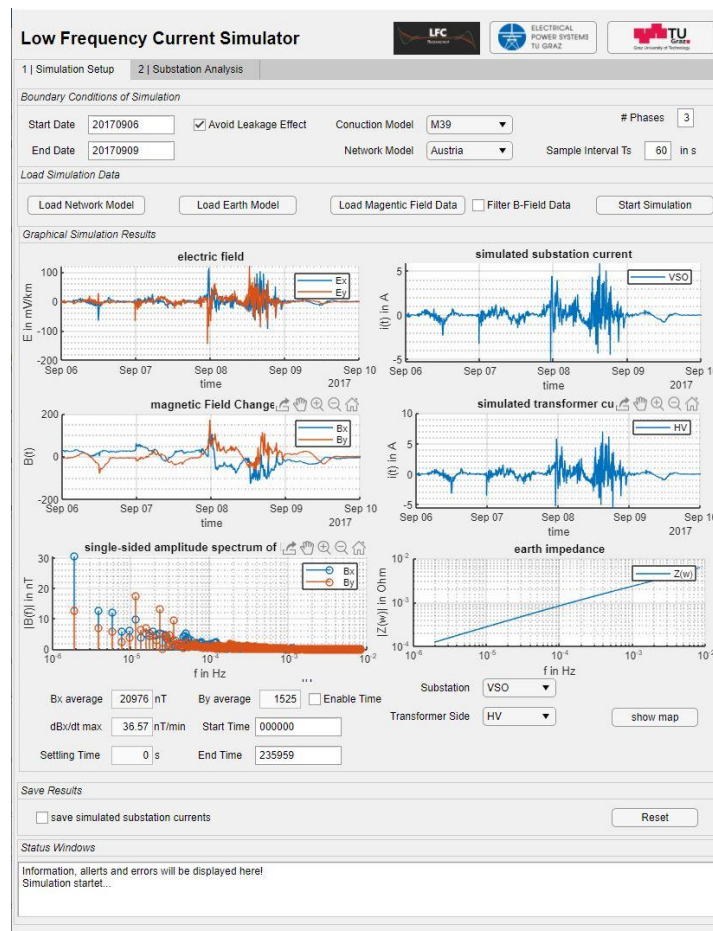


Abbildung 2: GIC-Simulator

Das Simulationsprogramm ist modular aufgebaut und kann mit Daten von verschiedenen Magnetfeldmessstationen und Energienetzen verwendet werden. Der Einfluss verschiedener Erdleitfähigkeitsmodelle auf die Genauigkeit der Simulationen wurde in [16] und [17]

untersucht, wobei das Modell mit der höchsten Auflösung die beste Korrelation zwischen Messung und Simulation erbrachte.

3.2 Messungen im österreichischen Übertragungsnetz

Transformator-Sternpunktmessungen von niederfrequenten Strömen werden in fünf Umspannwerken in Österreich durchgeführt (siehe Abbildung 3). Die Sternpunktströme werden mit 1 Sample/s aufgezeichnet und über UMTS an einen Server übertragen. Die kontinuierlichen Messungen laufen seit 2016 und werden um weitere Messstationen erweitert.

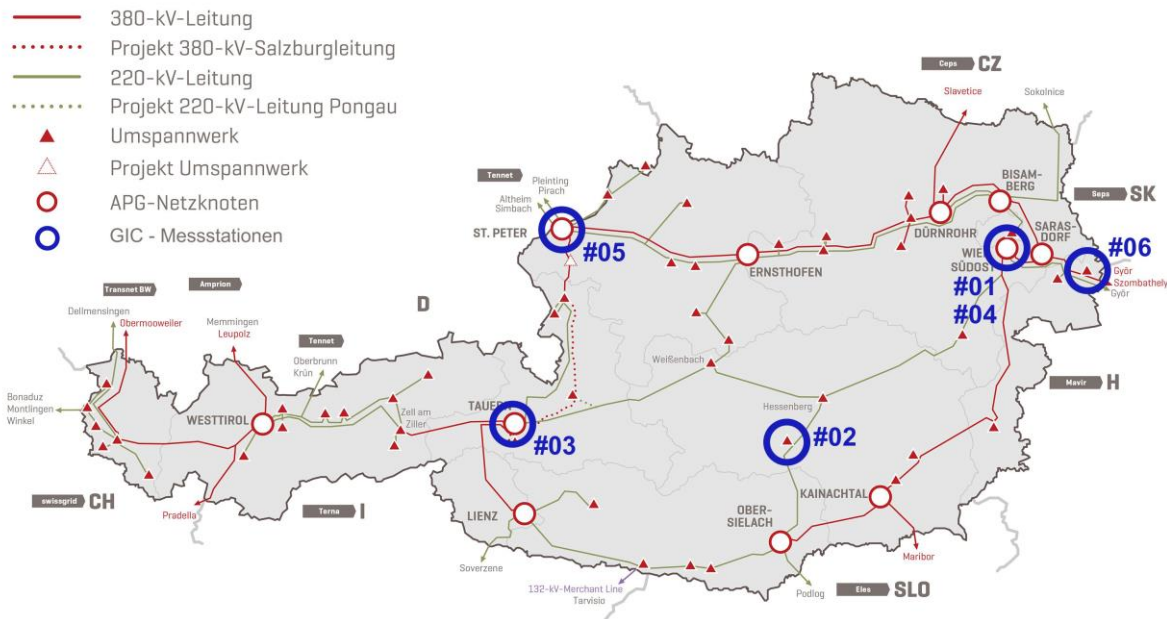


Abbildung 3. Messstellen in Österreich

Zusätzlich zum Sternpunktstrom werden bei den nächsten Messsystemen etwaige Kompensationsströme für einzelne Phasen mitgemessen.

Aus den gemessenen Strömen in Kombination mit Magnetfelddaten und dem geomagnetischen Aktivitätsindex K_p und den Dst-Werten kann ermittelt werden, ob die auftretenden Sternpunktströme durch Sonnenaktivität verursacht werden. In Abbildung 4 sind die Verläufe von zwei Sternpunktströmen, sowie die Magnetfelddaten ersichtlic.

Die rot markierten Bereiche zeigen hohe Magnetfeldänderungen, sowie die dadurch entstandenen Änderungen der Sternpunktströme.

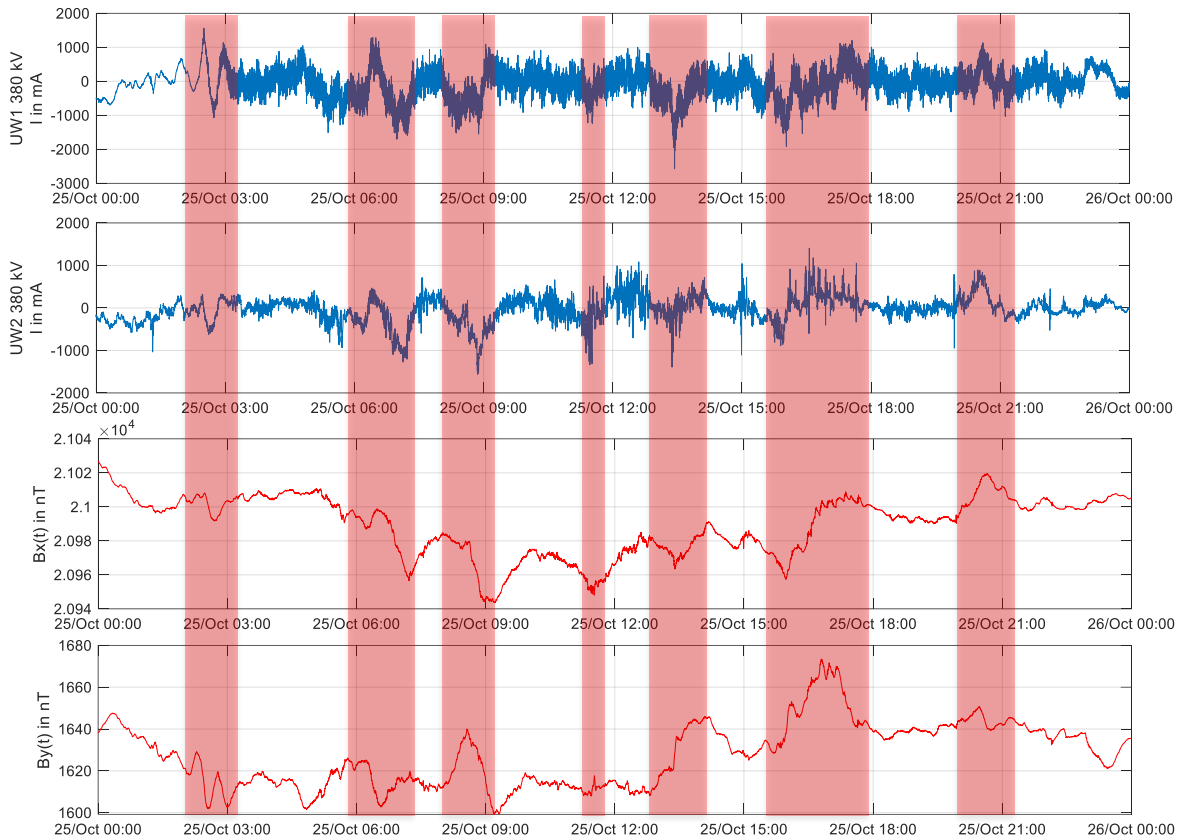


Abbildung 4: Sternpunktmessung und Magnetfeld am 25. Oktober 2019

3.3 Laborversuche

Die Einflüsse von LFC auf Transformatoren im Hinblick auf erhöhte Geräuschpegel und Verluste wurden in [18] und [19] betrachtet, der Einfluss auf den Blindleistungsbedarf in [20].

Um die Auswirkungen besser untersuchen zu können, wurden im Labor des IEAN zwei Verteilnetztransformatoren aufgebaut (siehe Abbildung 5). Da es sich dabei um Transformatoren mit Yzn5 Schaltgruppe handelt, welche eingespeiste Gleichströme im Sternpunkt durch die Zick-Zack Schaltung kompensieren würden, wurden die ersten Versuche mit Batterien auf der Hochspannungsseite durchgeführt. Die Halbzyklussättigung, sowie erhöhte Geräuschwerte, konnten bereits bei Gleichströmen im Milliampere-Bereich auf der Primärseite (35 kV) gemessen werden.

In weiterer Folge wurden über das am IEAN vorhandene Power Hardware in the Loop System niederfrequente Ströme auf der Sekundärseite (400 V) in einzelnen und mehreren Phasen überlagert. Durch die Überlagerung des niederfrequenten asymmetrischen Stroms kann das Zeitverhalten der Transformatoren untersucht werden. Für weitere Untersuchungen werden die beiden Verteilnetztransformatoren umgebaut, so dass alle Wicklungsabgriffe der Niederspannungswicklung von außen zugänglich und beliebig verschaltet werden können.

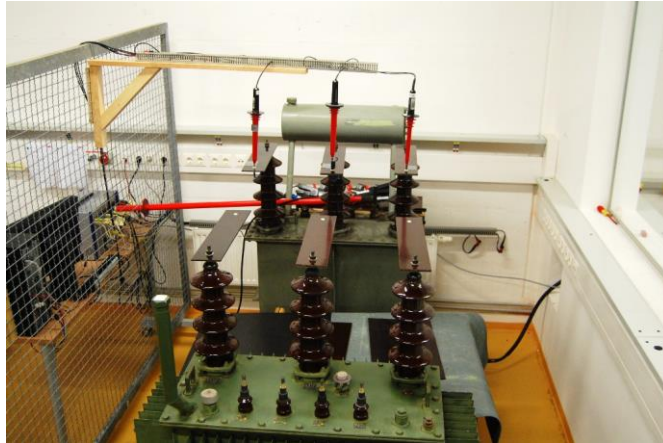


Abbildung 5: Versuchsaufbau der Verteilnetztransformatoren

4 Zukünftige Arbeit in Österreich

Für die weitere Forschung im Bereich der niederfrequenten Ströme in Österreich identifizieren die Autoren die folgenden vier Interessensgebiete und Aufgaben.

Modellierung, Simulation und Messungen

- Vergleich verschiedener Strommessverfahren,
- Installation weiterer Messeinheiten,
- Erweiterung der Messeinheit um einen Vibrationssensor,
- Verwendung eines detaillierteren Erdleitfähigkeitsmodells.

Vorhersage von Weltraumwetter und -effekten in Stromnetzen

- Machine Learning zur Vorhersage des Weltraumwetters,
- Modellierung anderer LFC-Verursacher,
- Blindleistungsbedarfsberechnung auf Basis von LFCs in Transformatoren.

Gegenmaßnahmen gegen Sternpunktströme in Stromnetzen

- GIC-Risikomanagement für das Übertragungsnetz,
- kurz- und langfristige Gegenmaßnahmen,
- invasive und nicht-invasive Gegenmaßnahmen.

Leistungstransformatoren unter LFC-Einfluss

- Blindleistungsbedarf in Abhängigkeit von LFC,
- Verhalten verschiedener Transformatortypen,
- Einfluss von LFC bei asymmetrischen und symmetrischen Lastsituationen.

5 Zusammenfassung

Forschung im Bereich der niederfrequenten Sternpunktströme wird in Österreich von mehreren Stellen vorangetrieben. Die Motivation und Ergebnisse aus bereits durchgeführten Studien wurden aufgezeigt und legen die Notwendigkeit für weitere Forschung in diesem Gebiet in Österreich dar. Aktuelle Fortschritte im Bereich der Simulation sowie Laborversuche wurden skizziert. Die vier großen zukünftigen Forschungsgebiete enthalten neben Simulation, Modellierung und Vorhersage auch die Erarbeitung von Gegenmaßnahmen sowie die genauere Betrachtung von Leistungstransformatoren. Diese Themen werden im Rahmen einer Kooperation von APG, Siemens AG Österreich und der TU Graz weiter erarbeitet.

6 References

- [1] P. Cannon, *Extreme space weather: Impacts on engineered systems and infrastructure*: Royal Academy of Engineering, 2013.
- [2] L. J. Lanzerotti, "Space Weather: Historical and Contemporary Perspectives," *Space Science Reviews*, vol. 212, no. 3, pp. 1253–1270, <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0408-y>, 2017.
- [3] L. Bolduc, "GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 16, pp. 1793–1802, 2002.
- [4] *Intense space weather storms October 19-November 07, 2003*. Available: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/6995/noaa_6995_DS1.pdf.
- [5] R. J. Pirjola and D. H. Boteler, "Geomagnetically Induced Currents in European High-Voltage Power Systems," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa, ON, Canada, 2006, pp. 1263–1266.
- [6] G. Le, J. A. Slavin, and R. J. Strangeway, "Space Technology 5 observations of the imbalance of regions 1 and 2 field-aligned currents and its implication to the cross-polar cap Pedersen currents," *J. Geophys. Res.*, vol. 115, no. A7, p. 6869, 2010.
- [7] H. Lühr and V. Haak, "Geophysik: Das Magnetfeld der Erde: Ein Schlüssel zum Verständnis der Dynamik im Erdinnern und der elektromagnetischen Prozesse im erdnahen Weltraum," *Phys. Bl.*, vol. 56, no. 10, pp. 33–38, 2000.
- [8] T. Halbedl, "Low Frequency Neutral Point Currents on Transformer in the Austrian power Transmission Network," Doctoral Thesis, TU Graz, Jan. 2019.
- [9] J. G. Kappenman, "Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations," *Space Weather*, vol. 1, no. 3, 2003.
- [10] N. B. Trivedi *et al.*, "Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study," *Space Weather*, vol. 5, no. 4, 2007.
- [11] A. Pulkkinen *et al.*, "Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness," *Space Weather*, vol. 15, no. 7, pp. 828–856, 2017.

- [12] A. Pulkkinen *et al.*, "Solar shield: forecasting and mitigating space weather effects on high-voltage power transmission systems," *Natural Hazards*, vol. 53, no. 2, pp. 333–345, 2010.
- [13] A. Pulkkinen, A. Taktakishvili, D. Odstrcil, and W. Jacobs, "Novel approach to geomagnetically induced current forecasts based on remote solar observations," *Space Weather*, vol. 7, no. 8, 2009.
- [14] P. Wintoft, M. Wik, and A. Viljanen, "Solar wind driven empirical forecast models of the time derivative of the ground magnetic field," *J. Space Weather Space Clim.*, vol. 5, no. 31, A7, 2015.
- [15] R. L. Bailey *et al.*, "Modelling geomagnetically induced currents in midlatitude Central Europe using a thin-sheet approach," *Ann. Geophys.*, vol. 35, no. 3, pp. 751–761, 2017.
- [16] R. L. Bailey, T. Halbedl, I. Schattauer, G. Achleitner, and R. Leonhardt, "Validating GIC Models With Measurements in Austria: Evaluation of Accuracy and Sensitivity to Input Parameters," *Space Weather*, vol. 16, no. 7, pp. 887–902, 2018.
- [17] T. Halbedl, H. Renner, R. L. Bailey, R. Leonhardt, and G. Achleitner, "Analysis of the impact of geomagnetic disturbances on the Austrian transmission grid," in *19th Power Systems Computation Conference*, Genoa, Italy, 2016, pp. 1–5.
- [18] F. Bachinger *et al.*, "Direct current in transformers: Effects and compensation," *44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, 2012.
- [19] H. Herterich, F. Klammer, P. Hamberger, and G. Leber, "Restoring efficiency, removing sound: Ready for DC in the grid with DC compensation and DC-ready transformers," https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=314150, 2018.
- [20] J. Raith, "Risk Assessment of Power Transformers under the Influence of Geomagnetically Induced Currents (GIC)," Doctoral Thesis, Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Graz, 2019.