

Modellierung und Analyse eines nachhaltigen, blackoutresistenten Niederspannungsnetzabschnittes

Christian Gererstorfer¹, Rainer Schlager

Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe,
Gußhausstraße 25 / E370-1, Telefonnr. : +43 | (0)1 | 58801 | 37301, E-Mail:
gererstorfer@ea.tuwien.ac.at, schlager@ea.tuwien.ac.at,
Web: <http://www.ea.tuwien.ac.at/>

Kurzfassung:

In diesem Paper werden mehrere Simulationen mit einem Niederspannungsnetz einer typischen ländlichen Siedlung durchgeführt. Dabei wird eine Netztrennung vom Mittelspannungsnetz simuliert und die Versorgung mit elektrischer Energie des Niederspannungsnetzes nach der Netztrennung durch eine Biogasanlage aufrechterhalten.

Des Weiteren werden auch die Auswirkungen von unterstützenden Systemen, wie zum Beispiel Lastabwurfsteuerungen für die Hauslasten oder zusätzliche Schwungmassen an der Biogasanlage, untersucht.

Es zeigt sich, dass die problematische Phase der Einschwingvorgang der Netzfrequenz und der Netzspannung direkt nach der Netztrennung ist. In diesem Zeitbereich können die Netzfrequenz und Netzspannung Werte annehmen, welche außerhalb eines zulässigen Bereiches, welcher in dieser Arbeit $\pm 10\%$ von deren Nennwerte beträgt, liegen. Die Leistungseinspeisung der Biogasanlage muss vor der Netztrennung innerhalb eines Bereiches um den Leistungsbedarfs des Niederspannungsnetzes liegen, damit die Netzfrequenz und die Netzspannung diesen erlaubten Bereich nicht überschreitet.

Keywords: Micro Grid, Blackout, dezentrale Versorgungssicherheit

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Ein starker Ausbau erneuerbarer dezentraler Energieerzeugungsanlagen, Integration intelligenter Netzkomponenten, steuerbare Erzeugungsanlagen wie BHKWs, dezentrale Speicher und flexible Verbraucher werden in zukünftigen Netzstrukturen eine immer größere Rolle spielen.

Die Summe dieser Komponenten bildet geeignete Voraussetzungen um Netzabschnitte mittels intelligenter Systemlösungen und Betriebsalgorithmen mit Hilfe nachhaltiger Energieträger resistent gegenüber externer Versorgungsunterbrechungen zu gestalten.

¹ Jungautor

In der Diplomarbeit werden für einen einfachen Modellversorgungscluster Konzepte für eine stabile Notversorgung bei Auftreten externer Versorgungsunterbrechungen analysiert.

Der Fokus liegt hierbei auf den Untersuchungen für eine unterbrechungsfreie Versorgung mittels inselfähigen Biogasanlagen welche durch unterstützende Maßnahmen, wie zum Beispiel dem Einsatz von geeigneten Lastabwurfsteuerungen bzw. Erhöhung der Trägheitsmassen, verbessert werden.

2 Methodische Vorgangsweise

In diesem Kapitel wird auf die verwendete Simulationsmethode und auf das Simulationsmodell eingegangen.

2.1 Simulationsmethode

Die Simulationen wurden mit dem Modul **Transiente Stabilität**, welches das Programm Neplan® beinhaltet, durchgeführt. Mit diesem Modul können Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen berechnet werden. Dabei werden die algebraischen Netzgleichungen und die Systemgleichungen von dynamischen Komponenten gelöst. Die Gleichungen aller Komponenten werden zu einem Gleichungssystem zusammengefasst, welches ein mathematisches Modell des zu simulierenden Netzes darstellt. [1]

Des Weiteren können neben den primären Betriebsmitteln auch sekundäre Betriebsmittel (Schutzeinrichtungen, Messeinrichtungen, usw.) simuliert werden, wodurch eigenständige Schaltvorgänge vom Programm getätigt werden können. [1]

Ausgangspunkt einer Simulation sind die Ergebnisse einer zuvor durchgeführten Lastflussberechnung, welche die Ergebnisse für einen stationären Betriebszustand liefern. Anschließend wird die simultane Lösung für die algebraischen Netzgleichungen und die Systemgleichungen der dynamischen Komponenten zu jedem Zeitpunkt ermittelt. [1]

Die algebraischen Netzgleichungen sind die mathematischen Gleichungen, welche das Modell von quasistationären Komponenten beschreibt. Quasistationäre Komponenten sind: [1]

- Leitungen
- Transformatoren
- konstante Kompensatoren
- Lasten konstanter Impedanz [1]

Die Modellgleichungen der quasistationären Komponenten werden aus deren komplexen Admittanzen bzw. aus deren Admittanzmatrizen gebildet. Diese werden anschließend zu einer Netzadmittanzmatrix zusammengesetzt. Die Netzadmittanzmatrix ist eine quadratische Matrix dessen Ordnung der Anzahl der Knoten im Netz entspricht. Mit der Netzadmittanzmatrix kann folgende Gleichung angeschrieben werden: [1]

$$2.1 \quad \underline{u} = \underline{Y}_N^{-1} * \underline{i} \quad [1]$$

Wenn die Knotenströme bekannt sind kann mittels Netzađmittanzmatrix die Knotenspannungen berechnet werden. Die Netzađmittanzmatrix wird während der Simulation nur geändert, wenn sich etwas an der Topologie des Netzes ändert. [1]

Dies bedeutet, dass die Netzađmittanzmatrix nur durch einen Schaltvorgang aufgrund eines Schaltvorganges durch eine Schutzeinrichtung, durch eine Netzstörung, usw. geändert wird. [1]

Die einspeisenden Knotenströme für die Gleichung 2.1 erhält man aus den Systemgleichungen der dynamischen Komponenten. Die Systemgleichungen werden für jene Komponenten verwendet, welche durch algebraische und dynamische Gleichungen beschrieben werden und in der Zustandsform folgendermaßen allgemein lauten: [1]

$$2.2 \quad \frac{dx}{dt} = A * x + B * u \quad [1]$$

$$2.3 \quad y = C * x + D * u \quad [1]$$

2.2 Simulationsmodell

2.2.1 Netz- / Leitungsmodell

Das Modell des Niederspannungsnetzes, welches in Abbildung 2 dargestellt ist, entspricht einem realen Niederspannungsnetz einer Siedlung in Österreich. Dadurch ist die Grundvoraussetzung für realistische Simulationsergebnisse gegeben.

In der Abbildung 1 ist das verwendete Modell der Leitungen dargestellt.

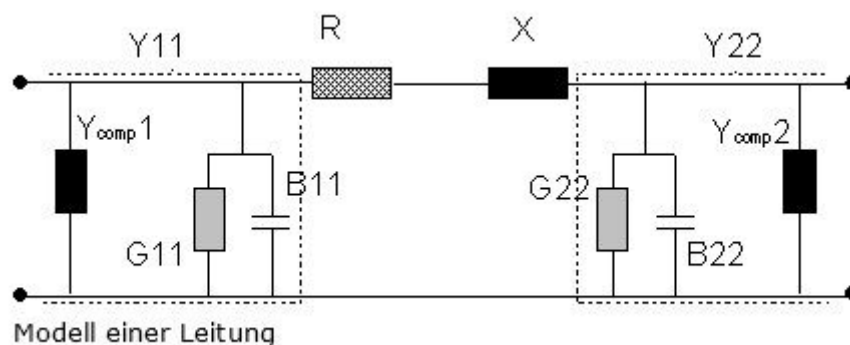


Abbildung 1: Leitungsmodell [1]

Für die Leitungen des Niederspannungsnetzes wurde Y_{11} und Y_{22} mit 0 angenommen und die Werte für R und X errechnen sich durch folgende Formeln:

2.2.2 Modell der Hauslasten

In Abbildung 3 ist der Aufbau der Last eines Haushaltes dargestellt. Die Last wurde in drei Kategorien unterteilt, um eine Kategorisierung bei einem Lastabwurf durchführen zu können. Die Gesamtlast pro Haushalt beträgt 2,103 kVA mit einem Leistungsfaktor von 0,95. Im Niederspannungsnetz sind Knoten vorhanden mit keinem, einem oder zwei angeschlossenen Haushalten.

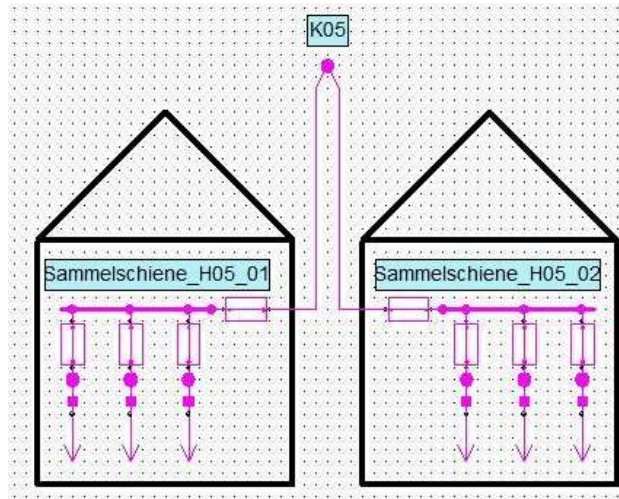


Abbildung 3: Modell eines Haushalts

Das Modell der Lasten besteht aus einem statischen und einem dynamischen Teil. Bei diesen Lasten können einige Parameter eingestellt werden, um verschiedene Lasttypen nachbilden zu können. [1]

Für das statische Lastmodell kann mit den Formeln 2.6 und 2.7 das Verhalten bestimmt werden.

$$2.6 \quad p = p_0 * \left(A_{0P} * \left(\frac{u}{u_0} \right)^{N_{0P}} + A_{1P} * \left(\frac{u}{u_0} \right)^{N_{1P}} + A_{2P} * \left(\frac{u}{u_0} \right)^{N_{2P}} \right) * \left(1 + \frac{\Delta f}{f_0} * C_{FP} \right) \quad [1]$$

$$2.7 \quad q = q_0 * \left(A_{0Q} * \left(\frac{u}{u_0} \right)^{N_{0Q}} + A_{1Q} * \left(\frac{u}{u_0} \right)^{N_{1Q}} + A_{2Q} * \left(\frac{u}{u_0} \right)^{N_{2Q}} \right) * \left(1 + \frac{\Delta f}{f_0} * C_{FQ} \right) \quad [1]$$

Für die Parameter wurden die voreingestellten Werte des Simulationsprogramm Neplan® verwendet:

$$T_P, T_Q, A_{0P}, N_{0P}, A_{0Q}, N_{0Q}, A_{1P}, N_{1P}, A_{1Q}, N_{1Q}, C_{FP}, C_{FQ} = 0$$

$$A_{2P}, A_{2Q} = 100 \%$$

$$N_{2P}, N_{2Q} = 2$$

Durch die eingestellten Parameter verhalten sich die Lasten wie eine konstante Impedanz, wodurch die Leistungsaufnahme nicht konstant, sondern von der Spannung abhängig ist.

2.2.3 Lastabwurfsteuerung

In der Arbeit wurden unterschiedliche Lastabwurfalgorithmen entworfen und hinsichtlich deren Effekts auf den Einschwingvorgang der Netzfrequenz nach der Netztrennung untersucht.

Die Schwingungen der Netzfrequenz werden umso größer, je größer die Differenz zwischen der Einspeiseleistung der Biogasanlage, welche sich im Niederspannungsnetz als lokaler Erzeuger befindet, und dem Leistungsbezug des Niederspannungsnetzes vor der Netztrennung ist. Die Lastabwurfsteuerung soll diese Differenz ermitteln und die passende Anzahl an Hauslasten abschalten. Die Differenz der Leistungen zwischen Biogasanlage und Niederspannungsnetz vor der Netztrennung kann auf verschiedene Weise ermittelt werden. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Varianten entworfen, welche in den folgenden Unterpunkten näher erläutert werden. Des Weiteren wird in den nachfolgenden Simulationen untersucht, wie sich die Reaktionszeit der Lastabwurfsteuerungen auf den Einschwingvorgang nach der Netztrennung auswirkt.

2.2.3.1 Lastabwurfsteuerung 1

Der Lastabwurfsteuerung 1 schaltet die 3 Lastgruppen eines Haushaltes (siehe Abbildung 3) in Abhängigkeit der Frequenzdifferenz zum Sollwert der Netzfrequenz (50 Hz) ab. Das Abschaltverhalten ist durch die Kurve in Abbildung 4 abgebildet. Man kann erkennen, dass der Schaltvorgang erfolgt, wenn eine gewisse Frequenzabweichung durchgehend für einen gewissen Zeitbereich vorhanden ist. Je kleiner die Frequenzabweichung ist, desto längere Zeit muss diese anliegen um einen Schaltvorgang auszulösen.

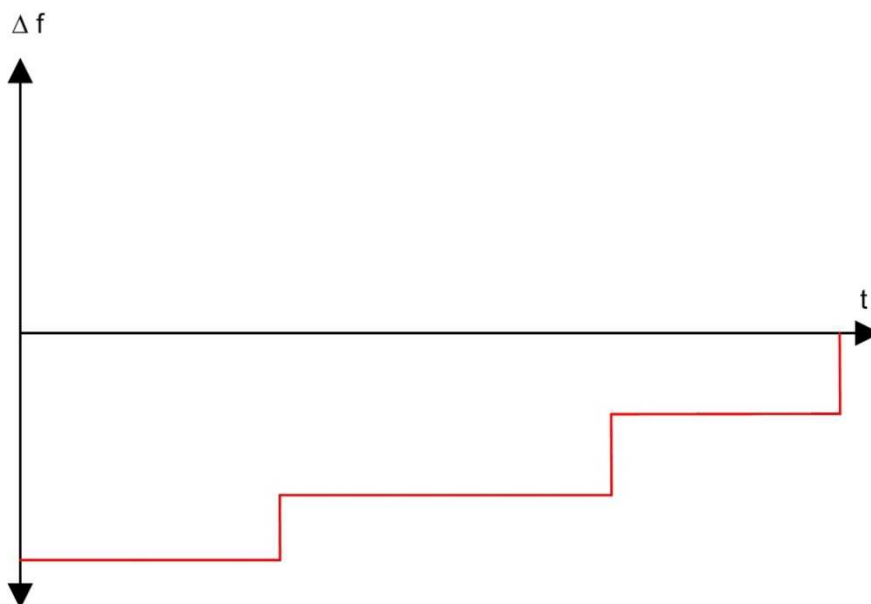


Abbildung 4: Lastabwurfsteuerung 1, „Controller- Kurve“

Aus der Abbildung 4 erkennt man, dass die Abschaltvorgänge nur dann erfolgen sollen, wenn Δf negativ ist. Dies bedeutet, dass die Erzeugung der Biogasanlage vor der Netztrennung kleiner ist als der Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes. Das Problem

ist, zu erkennen ob die Erzeugung der Biogasanlage nun vor der Netztrennung größer oder kleiner ist als der Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes. Die Abbildung 5 zeigt den Einschwingvorgang der Netzfrequenz nach der Netztrennung bei einer zu großen Einspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung und die Abbildung 6 zeigt den Einschwingvorgang bei zu kleiner eingespeister Leistung. Man kann erkennen, dass in beiden Fällen die Differenz der Netzfrequenz zur Nennfrequenz positive und negative Werte annimmt. Der Verlauf in der Abbildung 5 darf keine Lastabschaltung zur Folge haben. Dies wird erreicht in dem man die Steigung der Netzfrequenz unmittelbar nach der Netztrennung betrachtet (in Abbildung 5 und in Abbildung 6 mit rotem Kreis gekennzeichnet). Ist die anfängliche Steigung der Netzfrequenz positiv, muss die Lastabwurfsteuerung deaktiviert werden.

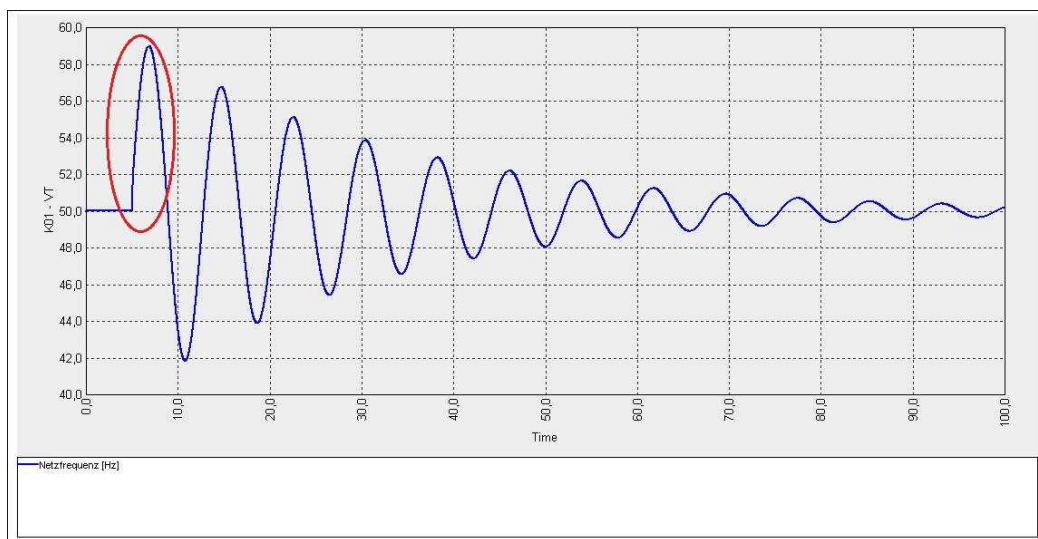


Abbildung 5: Einspeisung Biogas vor der Netztrennung > Leistungsbedarf im Niederspannungsnetz

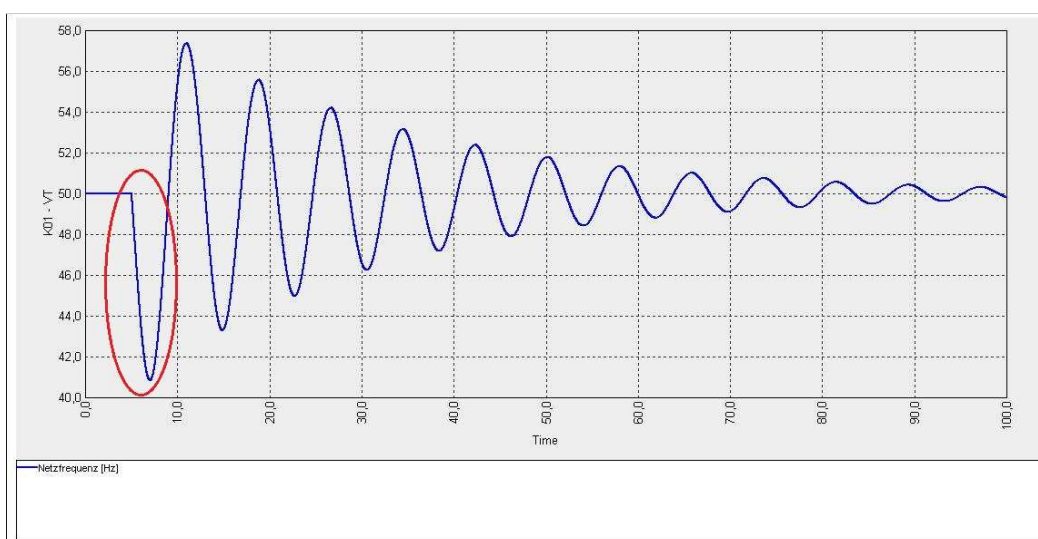


Abbildung 6: Einspeisung Biogas vor der Netztrennung < Leistungsbedarf im Niederspannungsnetz

2.2.3.2 Lastabwurfsteuerung 2

Bei der Lastabwurfsteuerung 1 erfolgt die Bestimmung ob die Einspeiseleistung der Biogasanlage vor der Netztrennung kleiner oder größer ist als der Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes mit einer Überprüfung des Vorzeichens der Steigung unmittelbar nach der Netztrennung (negative Steigung → Einspeiseleistung kleiner als Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes).

Die Idee hinter der Lastabwurfsteuerung 2 ist, dass nicht nur das Vorzeichen der Steigung der Netzfrequenz unmittelbar nach der Netztrennung überprüft wird, sondern auch der Wert der Steigung der Netzfrequenz. Aus dem Wert der Steigung wird die Differenz der Einspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung mit dem Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes ermittelt und daraus das Abschaltkriterium der Lasten festgelegt.

2.2.3.3 Lastabwurfsteuerung 3

Bei der Lastabwurfsteuerung 3 wurde nicht die Netzfrequenz überwacht, sondern eine Leistungsmessung für die Erzeugung der Biogasanlage und des Leistungsbedarfes des Niederspannungsnetzes simuliert. Somit wird die Differenz der Leistungen vor der Netztrennung nicht indirekt über die Netzfrequenz sondern direkt ermittelt. Dadurch kann dieses System in der praktischen Realisierung eventuell geringere Reaktionszeiten erreichen. Die notwendige Ableitung der Netzfrequenz, welche für die Lastabwurfsteuerung 2 nötig ist, benötigt einen größeren Rechenaufwand als die Differenzbildung der beiden Leistungen und somit wird dieses System im praktischen Einsatz etwas längere Reaktionszeiten besitzen.

Im Simulationsmodell kann die Frequenz direkt als Messgröße verwendet werden. In der Realität ist eine Frequenzmessung insbesondere bei verrauschten oder Oberschwingungsbehafteten Signalen schwierig und liefert dadurch nur verzögerte Messergebnisse, wobei die Verzögerung ggf. zu lang ist, um noch angemessen reagieren zu können.

Die Lastabwurfsteuerung 3 bildet die Differenz zwischen der Wirkleistungserzeugung der Biogasanlage und der Wirkleistung auf der Leitung L_01_02 (Leitung zwischen Knoten K01 und K02). Die Laststeuerung 3 wurde so modelliert, dass eine Differenzbildung kurz vor der Netztrennung erfolgt. Grund dafür ist, dass der Wert der Differenz zwischen der Wirkleistungserzeugung der Biogasanlage und des Wirkleistungsbedarfes des Niederspannungsnetzes nach der Netztrennung durch dynamische Vorgänge kurzzeitig stark schwankt und es somit zu fehlerhaften Lastabschaltungen kommt.

2.2.4 Biogasanlage

Das Simulationsmodell der Biogasanlage besteht aus den Simulationsmodellen des Synchrongenerators und dessen Spannungsregler sowie des Gasmotors, der den Synchrongenerator antreibt und des Drehzahlreglers der die Drehzahl des Gasmotors regelt. Diese Simulationsmodelle werden in den folgenden Unterpunkten näher beschrieben.

2.2.4.1 Synchrongenerator

Für das Simulationsmodell wurden die Daten (siehe Tabelle 1) des Synchrongenerators des Typs ECO 34 1L der Firma Pfeiffer Elektromotoren GmbH verwendet. Dieser wird von einem Gasmotor angetrieben, wobei der Maschinen-Generator-Block einer Biogasanlage entspricht. Für die Simulationen wurden folgende Werte des Synchrongenerators verwendet:

| | | | | | |
|---|-----------------------|--------|----------------------------------|-----------------------|-------|
| Scheinleistung | S 50 Hz [kVA] | 113 | Gegenreaktanzen | X ₂ [%] | 17,7 |
| direkte Synchronreaktanzen | X _d [%] | 205 | Null- Phasenfolge Reaktanzen | X ₀ [%] | 2,8 |
| direkte vorübergehende Synchronreaktanzen | X' _d [%] | 16,5 | vorübergehende Zeitkonstante | T' _d [ms] | 37,2 |
| direkte momentane Synchronreaktanzen | X'' _d [%] | 6,5 | momentane Zeitkonstante | T'' _d [ms] | 7,6 |
| um 90°verschobene Synchronreaktanzen | X _q [%] | 141,4 | einseitig gerichte Zeitkonstante | T _α [ms] | 16,3 |
| um 90°verschobene vorübergehende Synchronreaktanzen | X' _q [%] | 141,4 | Leerlauf- Zeitkonstante | T' _{do} [s] | 1,8 |
| um 90°verschobene momentane Synchronreaktanzen | X'' _q [%] | 28,7 | Kurzschlussverhältnis | K _{CC} | 0,51 |
| Massenträgheit | J [kgm ²] | 1,0308 | Statorwicklungswiderstand | R _S [Ω] | 0,018 |

Tabelle 1: Generatordaten 113 kVA [2]

Die Nenneinspeiseleistung, aufgespalten auf die Wirkleistung und die Blindleistung, ergibt sich aus der Nennscheinleistung S_N und den Leistungsfaktor cos(φ).

$$2.8 \quad \underline{P_N} = S_N * \cos(\varphi) = 113\text{kVA} * 0,8 = \underline{\underline{90,4 \text{ kW}}}$$

$$2.9 \quad \underline{Q_N} = S_N * \sin(\cos^{-1}(0,8)) = 113\text{kVA} * 0,6 = \underline{\underline{67,8 \text{ kVA}}}$$

Für eine dynamische Simulation benötigt man die Trägheitskonstante H [s]. Welche wie folgt berechnet wird:

$$2.10 \quad H = \frac{1}{2} * T_j = \frac{J * \omega_{M,N}^2}{2 * S_N} = \frac{J * \omega_{Netz}^2}{2 * S_N * p_Z^2} \quad [3]$$

Für den Biogasmotor wurde als Trägheitskonstante derselbe Wert angenommen wie für den Synchrongenerator (H_{GEN} = H_{Engine} → H_{GES} = 2 * H_{GEN}).

Die Nenndrehzahl des Synchrongenerators beträgt 1500 U/min.

$$2.11 \quad \underline{\underline{H_{Gen}}} = \frac{J * \omega_{M,N}^2}{2 * S_N} = \frac{1,0306 \text{ kgm}^2 * (2 * \pi * 25 \frac{1}{s})^2}{2 * 113 \text{ kVA}} = \underline{\underline{0,1125 \text{ s}}}$$

2.2.4.2 Spannungsregler

Als Spannungsregler wurde der in Neplan® verfügbare COTT- TEST- EXCITER verwendet (siehe Abbildung 7). [1]

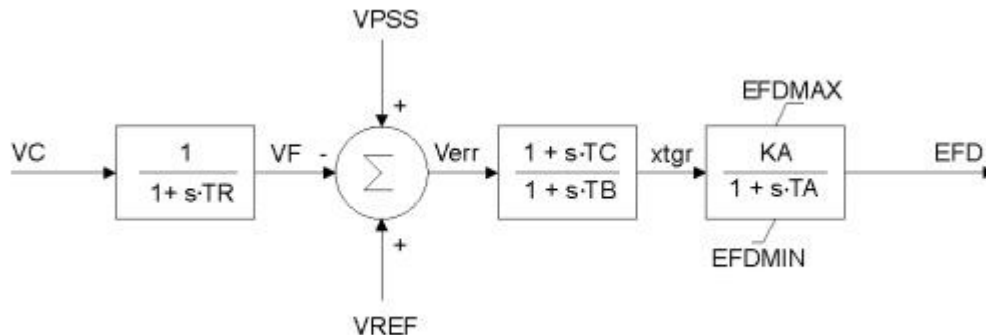


Abbildung 7: Spannungsregler Synchrongenerator [1]

Der Spannungsregler wird mit folgenden Parametern betrieben:

$$T_R = 0,01, K_A = 200, T_A = 0,015, T_B = 10, T_C = 1, E_{D_{MAX}} = 2,7, E_{D_{MIN}} = 0 \quad [1]$$

V_C ist die überwachte Spannung und wird durch die Formeln 2.12, 2.13 und 2.14 beschrieben.

$$2.12 \quad V_T = V_D + jV_Q \quad [1]$$

$$2.13 \quad I = I_D + jI_Q \quad [1]$$

$$2.14 \quad V_C = \sqrt{(U_D - I_D * R_C + I_Q * X_C)^2 + (U_Q - I_D * R_C + I_Q * X_C)^2} \quad [1]$$

2.2.4.3 Biogas- Engine + Drehzahlregler

In Abbildung 8 ist das Simulationsmodell des Gasmotors und dessen Drehzahlregelung einer 100 kW Biogasanlage abgebildet, welche für die Simulation verwendet wird. Das Simulationsmodell besteht aus der Electric Control Box, dem Actuator und dem Engine. Die Übertragungsfunktionen der einzelnen Glieder sind in der Abbildung 8 in den einzelnen Blöcken dargestellt. Die einzelnen Parameter der Übertragungsfunktionen sind unterhalb der Abbildung 8 angeführt [3].

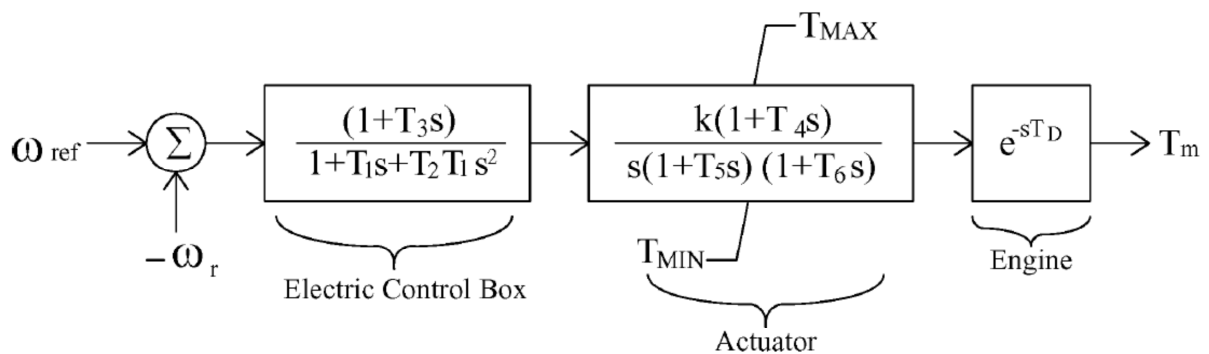


Abbildung 8: Biogas Engine [3]

$T_1 = 0,01 \text{ s}$; $T_2 = 0,02 \text{ s}$; $T_3 = 0,2 \text{ s}$; $T_4 = 0,25 \text{ s}$; $T_5 = 0,009 \text{ s}$; $T_6 = 0,0 \text{ s}$; $T_D = 0,024 \text{ s}$; $k = 0,33387$ [3]

$T_{MAX} = 1,1 \text{ p.u.}$; $T_{MIN} = 0 \text{ p.u.}$ [3]

Der Regelkreis aus Abbildung 8 wird mittels des in Neplan® verfügbaren Turbinenmodell DEGOV nachgebildet, welcher ein Woodward Diesel Regler ist.

3 Simulationen und Ergebnisse

In diesen Punkt werden die Simulationen mit dem, im Kapitel 5 beschrieben, Simulationsmodell erörtert.

3.1 1- Maschinen – System Netztrennung

Die Netzeinspeisung versorgt das Niederspannungsnetz über einen Transformator mit elektrischer Energie. Zum Zeitpunkt $t = 5$ Sekunden wird der Leistungsschalter LS1 geöffnet (siehe Abbildung 9). Damit wird aufgrund eines Fehlers im Mittelspannungsnetz eine Netztrennung des Niederspannungsnetzes vom übergeordneten Mittelspannungsnetz simuliert. Die dynamischen Auswirkungen des Fehlers selbst, zum Beispiel ein Kurzschluss, werden nicht berücksichtigt. Durch die Netztrennung kommt es zur Inselbildung des Niederspannungsnetzes. Anschließend soll die Energieversorgung durch lokale Erzeuger aufrechterhalten werden. Bei dem Knoten K01 beginnt das Netz der Siedlung. In Abbildung 9 ist die Einspeisung der Biogasanlage des 1-Maschinen-System, welches über eine Verbindungsleitung am Knoten K01 einspeist, dargestellt. Für die Einspeisleitung L_Biogas wird ein Kabel ($R = 0,6 \text{ } \Omega / \text{km}$, $X = 0,35 \text{ } \Omega / \text{km}$) mit einer Länge von $0,1 \text{ km}$ verwendet. Die Simulationen werden ohne zusätzliche unterstützende Maßnahmen (z.B.: Lastabwurfsteuerungen) durchgeführt und jene Betriebspunkte der Biogasanlage vor der Netztrennung ermittelt, bei denen die Netzfrequenz und die Netzspannungen in einen erlaubten Bereich bleiben.

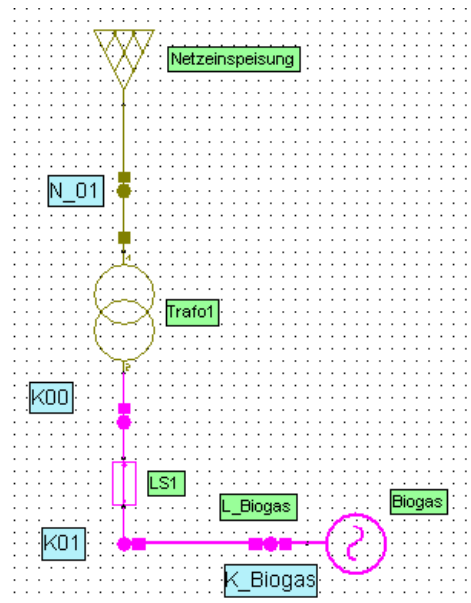


Abbildung 9: 1- Maschinen- System Netztrennung

3.1.1 1- Maschinen- System Betriebsgrenzen

Bei einer Wirkleistungseinspeisung von $P = 63,7 \text{ kW}$ und einer Blindleistungseinspeisung von $Q = 21,86 \text{ kVA}$ der Biogasanlage vor der Netztrennung kommt es zu annähernd keinen Einschwingvorgang der Netzfrequenz und der Netzspannung nach der Netztrennung. Bei voller Einspeisung des Synchrongenerators von $P = 90,4 \text{ kW}$ und $Q = 67,8 \text{ kVA}$ vor der Netztrennung, speist die Biogasanlage die Differenz ($P = 26,24 \text{ kW}$, $Q = 45,74 \text{ kVA}$) zum Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes über den Transformator Trafo 1 (siehe Abbildung 9) in das Mittelspannungsnetz ein. Durch die Trennung kommt es zu einer Inselbildung, wodurch der Synchrongenerator der Biogasanlage die „Führung“ des Inselnetzes übernimmt. Aus der Sicht des Synchrongenerators kommt es zu einem „Lastabwurf“ durch das Wegschalten der Leistung, welche über den Transformator Trafo1 in das Mittelspannungsnetz eingespeist wird. Dadurch kommt es im abgetrennten Niederspannungsnetz zu einem Einschwingvorgang der Frequenz und der Spannung.

In diesem Unterpunkt wird überprüft, in welchem Bereich sich die Einspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung befinden muss, damit die Netzfrequenz des Inselnetzes in einem Bereich von $50 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$ und die Spannung in einem Bereich von $400\text{V} \pm 40\text{V}$ bleibt.

Die ermittelten Grenzen für eine reine Wirkleistungseinspeisung vor der Netztrennung betragen $P = 57,65 \text{ kW}$ als untere Grenze und $P = 68,3 \text{ kW}$ als obere Grenze. In der Abbildung 10 und in der Abbildung 11 sind die Einschwingvorgänge für die Einspeisungen von $P = 57,65 \text{ kW}$ und $P = 68,3 \text{ kW}$ dargestellt.

Der Leistungsunterschied zwischen der Wirkleistungseinspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung und der Wirkleistungsaufnahme des Ortsnetzes muss zwischen $+ 4,6 \text{ kW}$ und $-6,05 \text{ kW}$ liegen. Bezogen auf die Nennwirkleistung der Biogasanlage ($90,4 \text{ kW}$) erhält man $+ 5,1 \%$ und $- 6,7 \%$ für die Leistungswerte. Der zulässige Leistungsunterschied ist im negativen Bereich größer als im positiven Bereich.

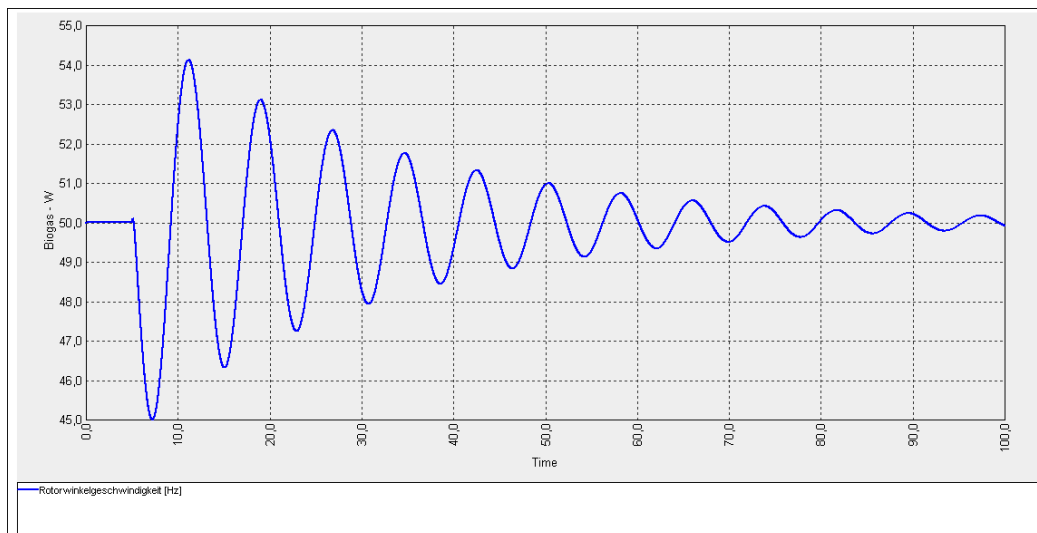


Abbildung 10: Frequenzeinschwingvorgang, Einspeisung vor der Netztrennung: $P = 57,65 \text{ kW}$

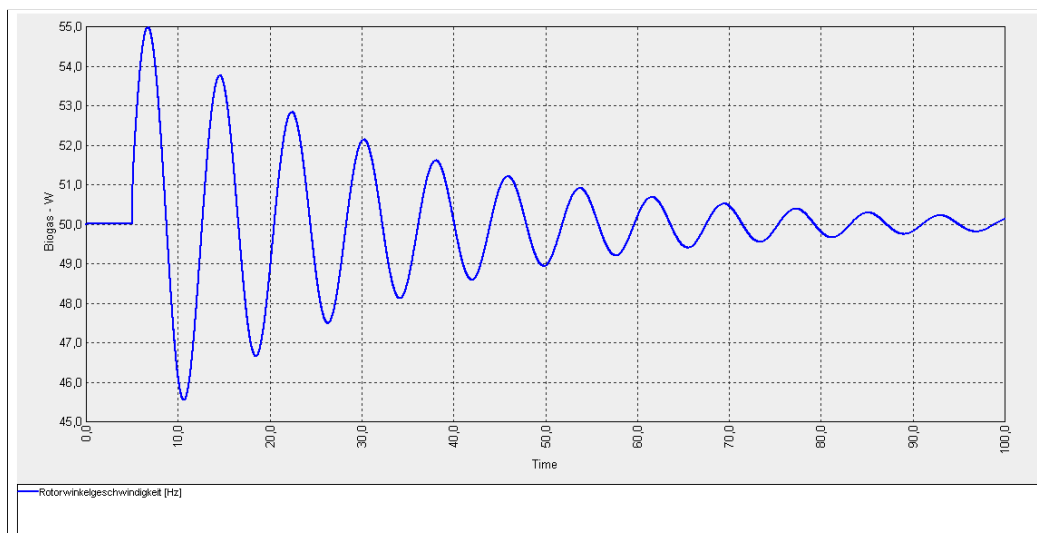


Abbildung 11: Frequenzeinschwingvorgang, Einspeisung vor der Netztrennung: $P = 68,3 \text{ kW}$

Aus den Ergebnissen der Simulationen mit einer zusätzlichen Blindleistungseinspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung lässt sich eine Abhängigkeit des Einschwingvorganges der Netzfrequenz von der eingespeisten Blindleistung erkennen. Der Grund dieser Abhängigkeit sind die als konstante Impedanz modellierten Lasten, da diese bei kleinerer Spannung eine geringere Leistung aus dem Netz beziehen. Ist vor der Netztrennung die Blindleistungseinspeisung der Biogasanlage größer als der Blindleistungsbedarf des Niederspannungsnetzes kommt es zu einer Spannungsspitze direkt nach der Netztrennung, hingegen bei einer zu kleinen Blindleistungseinspeisung der Biogasanlage kommt es zu einem Spannungseinbruch. Bei einem Spannungseinbruch ist der Leistungsbedarf direkt nach der Netztrennung aufgrund der konstanten Impedanzen reduziert und bei einer Spannungsspitze ist der Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes erhöht. Somit reduziert eine zu große Blindleistungseinspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung die Netzfrequenzschwankungen, wenn die Wirkleistungseinspeisung der Biogasanlage vor

der Netztrennung größer ist als der Wirkleistungsbedarf des Niederspannungsnetzes. Bei zu kleiner Wirkleistungseinspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung wirkt sich eine zusätzliche Blindleistungseinspeisung der Biogasanlage negativ auf das Ergebnis aus.

Die Blindleistungseinspeisung der Biogasanlage muss kleiner als 52 kVA bleiben damit die Spannungsspitze bzw. der Spannungseinbruch direkt nach der Netztrennung nicht außerhalb des Bereiches von $400V \pm 40V$ liegt.

In einem realen Niederspannungsnetz verhalten sich nicht alle Lasten wie konstante Impedanzen, sondern beziehen zum Beispiel spannungsunabhängig eine konstante Leistung aus dem Netz. Dies würde zu einer unterschiedlichen Abhängigkeit des Einschwingvorganges der Netzfrequenz von der Blindleistungseinspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung führen und somit ist diese Abhängigkeit von dem verwendeten Lastmodellen abhängig.

3.1.2 Zusätzliche Schwungmasse

Aus den bisherigen Simulationsergebnissen kann man erkennen, dass die Einspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung nicht wesentlich von dem Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes abweichen darf, damit die Frequenz und die Spannung beim Einschwingvorgang innerhalb eines zulässigen Bereichs gehalten werden kann.

In diesem Unterpunkt wird überprüft, wie stark die Schwingungen der Frequenz und der Spannung im Einschwingvorgang nach der Netztrennung mit Hilfe von zusätzlichen Trägheitsmassen an der Biogasanlage beeinflusst werden können.

Bei dieser Simulation wird die Trägheitskonstante H des Synchrongenerators vergrößert und somit eine zusätzliche Schwungmasse an der Biogasanlage simuliert. Die Trägheitskonstante wird bei der Simulation in einem Bereich von 0,225 s bis 2,225 s variiert. Dies entspricht einer Trägheitskonstante für die zusätzliche Schwungmasse von $H = 0$ s bis $H = 2$ s.

Eine größere Trägheitskonstante verringert die Schwingungen der Frequenz nach der Netztrennung. Mit zunehmender Trägheitskonstante werden die Frequenzschwankungen kleiner (siehe Abbildung 12).

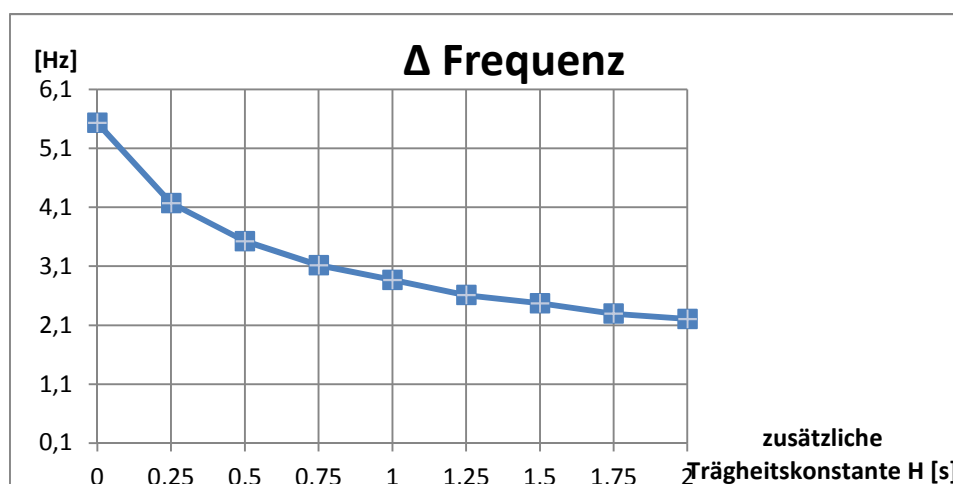


Abbildung 12: Frequenzschwankung (max. Wert – min. Wert) in Abhängigkeit von Schwungmassen

3.2 1- Maschinen – System Netztrennung + Lastabwurfsteuerung

Das 1-Maschinen-System der voran gegangenen Punkte wurde um eine Lastabwurfsteuerung erweitert. Bis auf die Erweiterung durch die Lastabwurfsteuerung bleibt das Simulationsmodell gleich. Dadurch können die Simulationsergebnisse verglichen werden und die Funktionsfähigkeit der unterschiedlichen Lastabwurfsteuerungen festgestellt werden. In den folgenden Unterpunkten soll nun untersucht werden, ob sich die Lastabwurfsteuerungen positiv auf den Einschwingvorgang der Netzfrequenz nach der Netztrennung auswirken.

3.2.1 Lastabwurfsteuerung 1

Durch die Simulationen mit der Lastabwurfsteuerung 1 stellte sich heraus, dass der Betrieb mit dieser Art von Lastabwurfsteuerung problematisch ist. Ein Problem ist, dass man die Abweichungszeit abwarten muss und erst dann der Schaltvorgang erfolgt. In dieser Zeit ist die Netzfrequenz bereits gesunken und der Schaltvorgang erfolgt zum Beispiel erst bei 47 Hz. Somit wird auf eine Frequenzänderung reagiert und dieser nicht vorgebeugt.

Die Verwendung einer solchen Lastabwurfsteuerung hat nur eine positive Wirkung auf das Ergebnis, wenn es sich um eine langsamere längerfristige Frequenzänderung handelt. Nimmt aufgrund von einer bestimmten Verbrauchs- und Erzeugungssituation die Netzfrequenz stetig ab, so ist im Netz zu wenig Erzeugung vorhanden. Auf solch eine Situation kann mit einer mehrstufigen Abschaltkennlinie gut reagiert werden. Bei einer kleinen und langsamen Abnahme der Netzfrequenz kann mit dem Schaltvorgang länger gewartet werden und überprüft werden, ob sich die Situation ohne Schaltvorgang lösen lässt.

Bei dieser Arbeit hingegen wird durch die Netztrennung das Niederspannungsnetz schlagartig zu einem Inselnetz und die Netzfrequenz nimmt nicht langsam zu oder ab, sondern es beginnt ein Einschwingvorgang der Netzfrequenz und somit muss schneller bei einer Unterversorgung des Niederspannungsnetzes durch die Biogasanlage mit Lastabwürfen reagiert werden.

3.2.2 Lastabwurfsteuerung 2

Die Lastabwurfsteuerung 2 wirft im Unterschied zur Lastabwurfsteuerung 1 unmittelbar nach der Netztrennung die passende Anzahl an Lasten ab. Bei einer zu geringen Einspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung fällt die Netzfrequenz nach der Netztrennung ab. Der Wert der Abfallgeschwindigkeit, welcher durch eine Ableitung ermittelt wird, bestimmt die Anzahl der abzuschaltenden Lasten.

Die Simulationen zeigten, dass bei drei möglichen Schaltvorgängen (3 Lastkategorien) die Lastsprünge bei gewissen Einspeiseleistungen der Biogasanlage vor der Netztrennung zu groß sind und somit die Frequenzschwankungen größer als $50 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$ werden.

Um die Auswirkungen einer genaueren Ansteuerung der Lasten zu simulieren, wurde die Ansteuerung einer Lastkategorie weiter unterteilt, wodurch man pro Lastkategorie 4 Lastabwürfe durchführen kann und somit insgesamt 12 Lastabwürfe zur Verfügung stehen. Dadurch wird pro Schaltvorgang eine kleinere Last abgeschaltet als ohne dieser zusätzlichen

Unterteilung, wodurch eine Differenz zwischen der Einspeiseleistung der Biogasanlage und dem Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes genauer ausgeglichen werden kann.

Dadurch kann im Gegensatz zu den Simulationen mit nur drei Schaltvorgängen (ohne Gruppierung) die Frequenzschwankungen Δf bis zu einer Wirkleistungseinspeisung von 40 kW unter 10 Hz (entspricht ± 5 Hz) gehalten werden (siehe Abbildung 13).

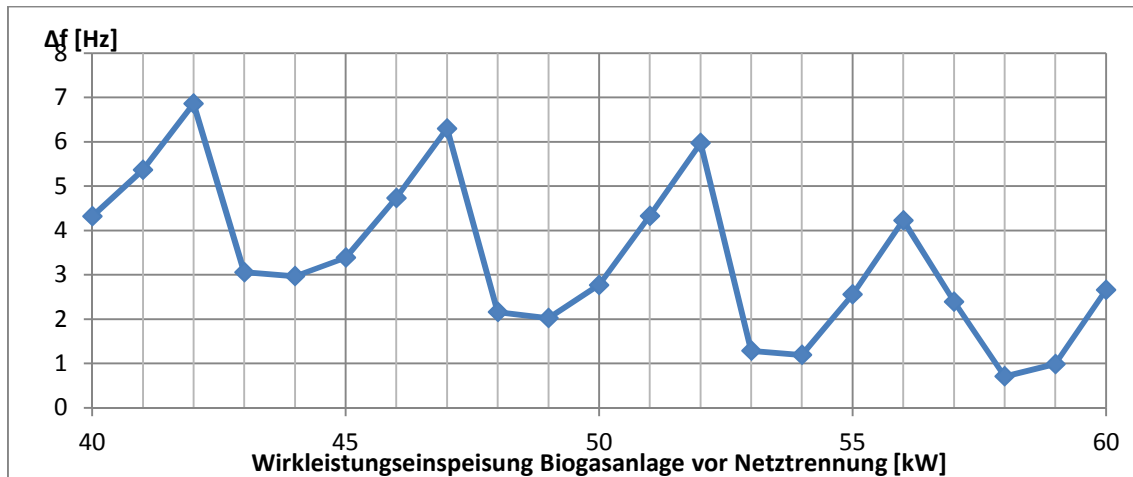


Abbildung 13: Frequenzschwankung (max. Wert – min. Wert) bei Lastabwurfsteuerung 2 mit 4 Untergruppen

Neben der Art der Lastabwurfsteuerung und der Höhe des Lastsprunges pro Schaltvorgang wirkt sich auch die Reaktionszeit der Lastabwurfsteuerung stark auf das Ergebnis aus (siehe Abbildung 14).

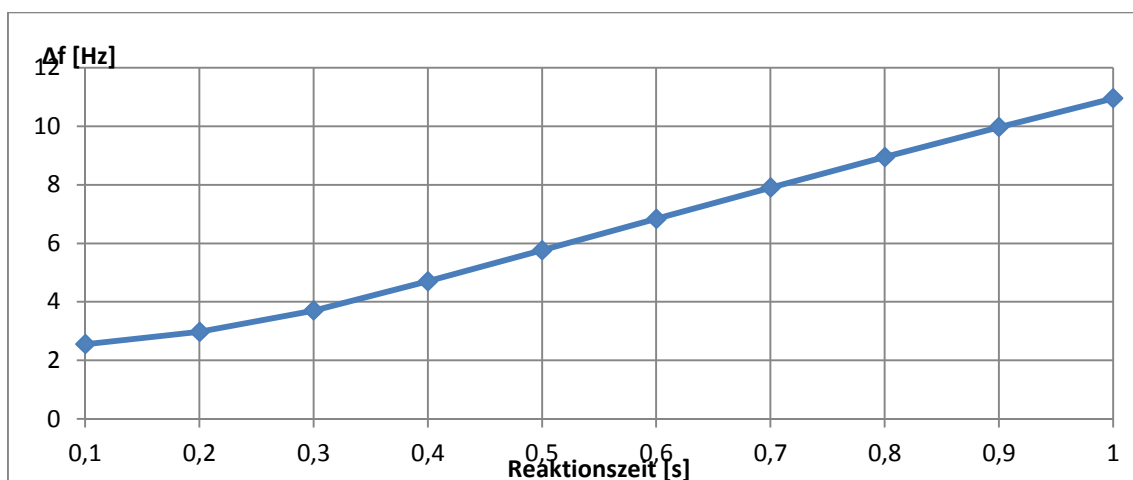


Abbildung 14: Lastabwurfsteuerung 2 mit Gruppierung-Reaktionszeit

3.2.3 Lastabwurfsteuerung 3

In der Abbildung 15 ist ein Spannungsverlauf am Knoten K01 nach der Netztrennung zum Zeitpunkt $t = 5$ Sekunden dargestellt. Die Einspeiseleistungen der Biogasanlage betragen dabei $P = 60$ kW und $Q = 10$ kVA. Man kann erkennen, dass es zu einem Spannungseinbruch und einen anschließenden Einschwingvorgang der Spannung nach der

Netztrennung kommt. Die Lasten im Simulationsmodell dieser Diplomarbeiten wurden als konstante Impedanzen definiert. Dies bedeutet, dass durch den Spannungseinbruch nach der Netztrennung die Leistungsaufnahme im Niederspannungsnetz in diesem Zeitbereich geringer ist. Die aufgenommene Leistung des Niederspannungsnetzes hängt quadratisch von der Spannung ab (siehe Gleichung 3.1).

$$3.1 \quad S = \frac{U^2}{Z}$$

Durch diese Spannungsabhängigkeit würde es bei einer Messung der Leistungen in den ersten Momenten nach der Netztrennung zu nicht korrekten Lastabwürfen kommen. Für den Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes würde bei einem Spannungseinbruch nach der Netztrennung ein kleinerer Wert als der tatsächliche Wert des Leistungsbedarfs des Niederspannungsnetzes im eingeschwungenen Zustand gemessen werden. Hingegen bei einer Spannungsspitze nach der Netztrennung würde ein zu großer Wert gemessen werden. Aus diesem Grund muss die Leistungsmessung vor der Netztrennung erfolgen.

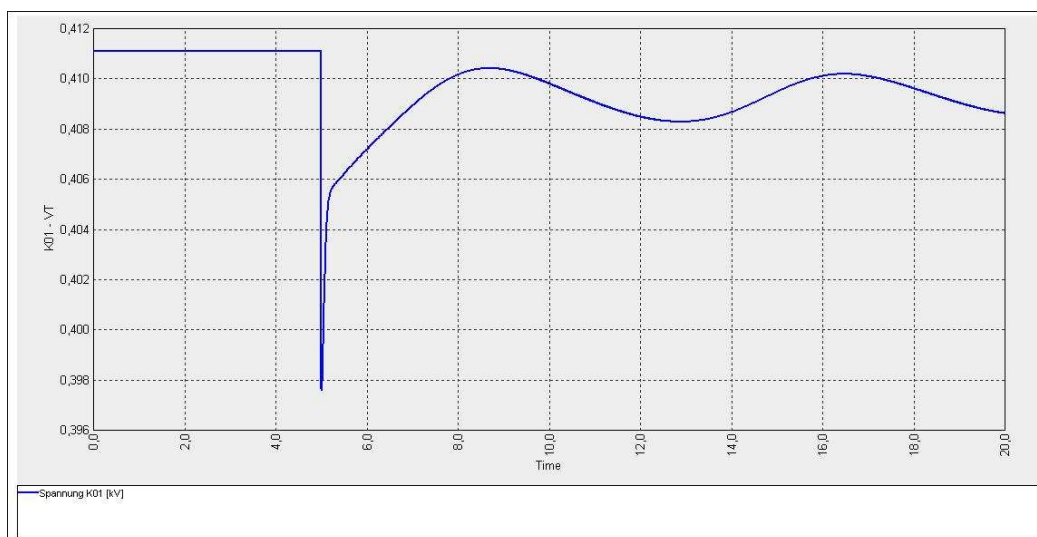


Abbildung 15: Spannungsverlauf nach Netztrennung

4 Schlussfolgerungen

Aus den vorangegangenen Simulationen kann man erkennen, dass durch die richtigen Randbedingungen ein realistisches Niederspannungsnetz durch eine typische Biogasanlage, nach einem Fehler in der Mittelspannungsebenen und damit verbundener Netztrennung mit Energie versorgt werden kann. Die problematische Phase ist der Einschwingvorgang der Netzfrequenz und der Netzspannung nach der Netztrennung. In diesem Zeitbereich können die Netzfrequenz und Netzspannung Werte annehmen, welche außerhalb eines $\pm 10\%$ vom Nennwert festgelegten Bereiches liegen.

Wird für die Aufrechterhaltung der Energieversorgung nach der Netztrennung nur eine Biogasanlage ohne zusätzlich unterstützende Maßnahmen verwendet, muss die Leistungseinspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung in einem gewissen Bereich um den Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes liegen. Normalerweise wird eine Biogasanlage im Nennpunkt betrieben, um die Erlöse zu maximieren. Somit müsste die Nenneinspeiseleistung der Biogasanlage im zulässigen Bereich um den Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes liegen. Da verschiedene Niederspannungsnetze einen unterschiedlichen Leistungsbedarf haben, müsste jedoch jede Biogasanlage an das betreffende Niederspannungsnetz angepasst werden.

Eine zusätzliche Schwungmasse an der Biogasanlage bewirkt eine Vergrößerung des zulässigen Arbeitsbereiches der Biogasanlage vor der Netztrennung. Dies bedeutet, dass die Leistungseinspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung in einem größeren Bereich um den Leistungsbedarf des Niederspannungsnetzes liegen kann als ohne zusätzlicher Schwungmasse. Somit kann eine Biogasanlage und deren Nenneinspeiseleistung besser an ein vorhandenes Niederspannungsnetz angepasst werden. Natürlich steigt mit dieser Maßnahme auch die Trägheit des Systems.

Durch Lastabwurfsteuerungen kann dieser Bereich bei zu kleiner Einspeisung der Biogasanlage vor der Netztrennung vergrößert bzw. mit einer Lastabwurfsteuerung, welche pro Schaltvorgang nur eine oder wenige Lasten abschaltet, beliebig weit erweitert werden. Die abgeschalteten Lasten müssen anschließend durch geeignete Zuschaltstrategien wieder an das Niederspannungsnetz zugeschaltet werden. Der Vorteil einer Lastabwurfsteuerung ist, dass nur unwesentliche Teile der Hauslast abgeworfen werden können und die Netzfrequenz und die Netzspannung trotzdem im erlaubten Bereich bleiben. Bei einer Lastabwurfsteuerung kommt es für einen funktionierenden Betrieb auf die überwachte Größe und auf die Reaktionszeit der Steuerung an.

Literatur

- [1] „Neplan Hilfe“
- [2] Pfeiffer Elektromotoren GmbH, „www.elektromotoren.at,“ [Online]. Available: http://www.elektromotoren.at/pdf.php?file=Synchrongeneratoren_47. [Zugriff am 21 Oktober 2012]
- [3] L. Wang und P.-Y. Lin, Analysis of a Commercial Biogas Generation System Using a Gas Engine–Induction Generator Set, 2009.