

Optimierung von Mittelspannungsnetzen durch Reduktion der Netzverluste

Timo Wißmann
Fachhochschule Bielefeld
Bielefeld, Deutschland
timo.wissmann@fh-bielefeld.de

Jens Haubrock
Fachhochschule Bielefeld
Bielefeld, Deutschland
jens.haubrock@fh-bielefeld.de

Ansgar Ottensmann
Fachhochschule Bielefeld
Bielefeld, Deutschland
ansgar.ottensmann@fh-bielefeld.de

Zusammenfassung — Durch die Umstrukturierung von Mittelspannungsnetzen in Deutschland sowie durch die Veröffentlichungs- und Ausschreibepflicht von Netzverlusten bekommt die Optimierung von Energieversorgungsnetzen mehr und mehr an Bedeutung. Dieser Beitrag befasst sich mit der Optimierung von einem Mittelspannungsnetz, welches durch verschiedene Spannungsebenen (110 kV und 30 kV) gespeist wird. Durch ein erhöhtes Anlagenalter der 30-kV-Betriebsmittel, soll überprüft werden ob die Möglichkeit besteht ein Umspannwerk 30/10 kV durch eine 10-kV-Stützpunktstation zu ersetzen. Hierzu werden zwei Varianten entwickelt und mit der Netzberechnungs- und Simulationssoftware PSS@Sincal hinsichtlich der Netzverluste untersucht. Als Vergleichsnetz wird ebenfalls auch das Ursprungsmittelspannungsnetz herangezogen, und untersucht welche Betriebsmittel zu ersetzen sind. Als weiterer Ansatzpunkt werden die ungefähren Kosten für die beiden Varianten und den Weiterbetrieb des Netzes aufgestellt [1].

Schlüsselwörter — Netzoptimierung, Netzverluste, Netzberechnung, Mittelspannung

I. EINLEITUNG

Mittelspannungsnetze werden in Deutschland für die Verteilung elektrischer Energie eingesetzt. Diese werden mit Nennspannungen von 10 kV oder 20 kV betrieben. Durch historische Gegebenheiten und Entwicklungen werden in der Bundesrepublik Deutschland teilweise noch Netze mit einer Nennspannung von 30 kV betrieben. Diese werden in Deutschland, wie auch die Niederspannungsnetze, als Verteilnetze bezeichnet [1], [2]. Die Aufgabe dieser Netze besteht darin, die Endkunden (Haushalt, Handel und Gewerbe) mit Energie zu versorgen und die aus den dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) erzeugte Energie aufzunehmen und zu verteilen. Teilweise werden Industriebetriebe ebenfalls aus der Mittelspannungsebene versorgt, dies ist hauptsächlich abhängig von der benötigten Anschlussleistung. Die Mittelspannungsebene wird aus der Hochspannungsebene (110 kV) über Transformatoren gespeist.

In diesem Beitrag werden die auftretenden Verluste von einem 30-kV-Kabel inklusive der Umspannverluste in die 10-kV-Ebene und die Verluste von einem 10-kV-Doppelkabel sowie einer 10-kV-Einfachleitung gegenübergestellt und genauer betrachtet. Die beiden Kabelverbindungen sind gleich lang und sind aus einem realen Netz, für eine städtische Versorgung von ca. 25 000 Einwohner entnommen. In diesem Fall soll der Ersatz des 30-kV-Kabels genauer betrachtet werden.

II. ZIELSETZUNG

Ein bestehendes, regionales Verteilnetz der Spannungsebenen 0,4 kV, 10 kV und 30 kV soll hinsichtlich der Netzverluste optimiert werden. Dazu wird überprüft, ob der bislang über die 30 kV Ebene versorgte Netzbereich über die 10 kV Ebene, als Stützpunktstation, versorgt werden kann.

III. AUSGANGSSITUATION UND MITTELSPANNUNGSNETZ

Das bestehende Verteilnetz repräsentiert ein 10-kV-Mittelspannungsnetz welches über zwei Umspannstationen direkt aus dem überlagerten 110-kV-Hochspannungsnetz und einer Umspannstation aus dem 30-kV-Mittelspannungsnetz gespeist wird. Im weiteren Verlauf werden die Umspannstationen als Umspannwerke (UW) bezeichnet. In Abbildung 1 ist schematisch die Einspeisung in die drei städtischen Teilnetze dargestellt:

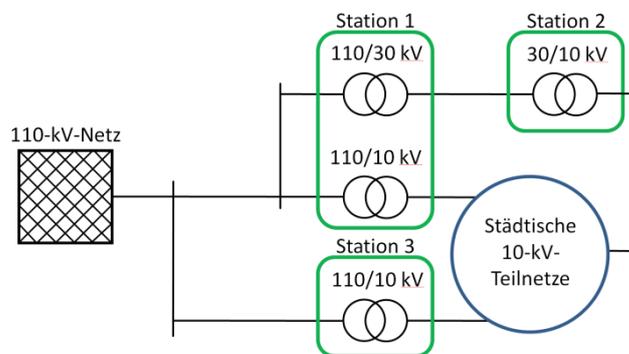


Abb. 1: Überlagerte Netze der 10-kV-Netzebene

Die städtischen 10-kV-Teilnetze werden als Strahlen- oder offene Strangnetze, mit der Möglichkeit über eine redundante Einspeisung in der Gegenstation, betrieben [3], [4]. Die Teilnetze untereinander besitzen, im Normalbetrieb, keine elektrische Verbindung. Die Trennstelle liegt in den meisten Fällen in der Mitte der Kabelstrecken. Das elektrische Verteilnetz ist, wie anfangs schon erwähnt einem realen Netz, eines VNB mit ca. 25 000 Einwohnern, entnommen.

Das in Abbildung 1 dargestellte 30-kV-Kabel zwischen der Station 1 und der Station 2 ist ein Teil eines vorhandenen 30-kV-Ringnetzes der Region, welches Mitte der 1960er Jahren errichtet worden ist. Das 30-kV-Kabel ist Anfang der 80er Jahre gelegt worden. Somit ist für zukünftige

tige Planungen mit einem Ersatz oder Rückbau für dieses Teilnetz auszugehen. Der Transformator im UW 2 ist Baujahr 1962, es sollte ebenfalls ein Ersatz für zukünftige Planungen in Betracht gezogen werden. Die Entfernung zwischen den beiden Stationen beträgt 3 km. Die Einspeisung des 30-kV-Mittelspannungsnetzes ist über einen Transformator 110/30 kV in dem UW 1 gesichert. Weitere Einspeisungen befinden sich nicht in unmittelbarer Nähe. In der Simulation mit dem Berechnungsprogramm PSS®Sincal, wird diese Kabelstrecke als Punkt zu Punkt Verbindung nachgebildet. Die Auslastung des Kabels entspricht der Netzlast des UW 2. Aufgrund der weiterführenden Kabel in dem UW 1 und 2 ist im Normalbetrieb eine deutlich höhere Auslastung zu erwarten. Somit sind einhergehend der tatsächliche Spannungsfall und die Verluste des Kabels höher anzusetzen.

Das Bestandsnetz hat eine Netzlast von 37,61 MVA, welche sich im Normalschaltzustand wie nachfolgend aufgeführt zusammensetzt:

- UW 1: 19,09 MVA
- UW 2: 6,23 MVA
- UW 3: 12,29 MVA

Die Netzlast wurde durch 215 Lasten modelliert, welche an 212 Transformatoren in Ortsnetz- oder Kundenstationen angeschlossen sind. Die Lasten ergeben eine Leistung von 30,27 MVA. An sieben Netzknoten wird elektrische Energie an benachbarte 10-kV-Netzzweige übergeben, welche nicht zum VNB-Netz gehören. Es ergibt sich eine Gesamtlast von 36,57 MVA. Ebenfalls sind in dem Netz drei Windkraftanlagen, mit insgesamt 53 kVA, nachgebildet. Ein Netzanschluss mit Windkraftanlage und ein Niederspannungstransformator mit Last, ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Transformatorverluste und die Kabelverluste sind ebenfalls mit PSS®Sincal nachgebildet [5], [6]. Die weiteren Betriebsmittel werden ebenfalls in der Software PSS®Sincal nachgebildet. Aus diesen Simulationen und Berechnungen resultieren die Ergebnisse welche nachfolgend als Datengrundlage dienen.

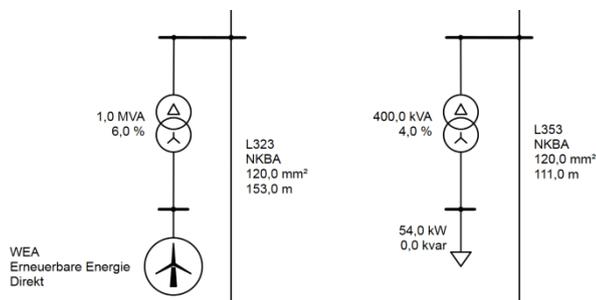


Abb. 2: Nachbildung der Betriebsmittel des MS-Netzes

Die Netzverluste in der 10-kV-Ebene belaufen sich auf 797 kW. Für eine weitergehende Bewertung und den Vergleich mit den zu entwickelten Varianten, ist es sinnvoll die Verluste des 30-kV-Verbindungskabels sowie des Transformators 30/10 kV ebenfalls zu berücksichtigen. Diese belaufen sich auf 53 kW, welche jedoch in Normalbetrieb höher ausgeprägt sein können. Es ergeben sich gesamte

Netzverluste von 850 kW, welche im weiteren Verlauf mit den folgenden Varianten verglichen werden sollen. Eine Betrachtung der Umspannverluste des Transformators 110/30 kV im UW 1 findet keine Anwendung, da dieser ebenso in das weiterführende 30-kV-Mittelspannungsnetz einspeist und das Ergebnis verfälschen würde.

Das in der DIN EN 50160 geforderte Spannungsband, von $\pm 10\%$, wird an allen Knoten des Netzes eingehalten. Die Spannung im 10-kV-Mittelspannungsnetz schwankt in einem Bereich von $99,3\% - 103,1\%$, es ergibt sich ein maximales Spannungsdelta von $3,8\%$. Die Spannungen an den Sammelschienen der einzelnen UW's liegen zwischen $102,4\% - 103,1\%$.

In der nachfolgend aufgeführten Tabelle sind die Veränderungen für die einzelnen Varianten aufgelistet. Im weiteren Verlauf werden diese kurz erläutert.

TABELLE I.
ÜBERSICHT DER VERÄNDERUNGEN IN DEN EINZELNEN VARIANTEN

| Variante | Veränderungen in dem Netz |
|-------------------------------------|---|
| Ausgangssituation und Weiterbetrieb | Gegebenenfalls Ersatz: <ul style="list-style-type: none"> • 30-kV-Kabel (1 oder 2 Systeme) • Transformator 110/30 kV • Transformator 30/10 kV • Schaltanlage und Schutztechnik 30/10 kV |
| Variante A | Neubau: <ul style="list-style-type: none"> • 10-kV-Kabel 2 Systeme Gegebenenfalls Ersatz: <ul style="list-style-type: none"> • Schaltanlage und Schutztechnik 10 kV |
| Variante B | Neubau: <ul style="list-style-type: none"> • 10-kV-Kabel 1 System Gegebenenfalls Ersatz: <ul style="list-style-type: none"> • Schaltanlage und Schutztechnik 10 kV |

Auf der Grundlage der Ausgangssituation des Mittelspannungsnetzes und des vorangeschrittenen Alters der 30-kV-Betriebsmittel ist im ersten Szenario der Ersatz des 30-kV-Kabels durch zwei 10-kV-Kabel vorgesehen. In diesem Fall werden zwei Kabelsysteme verwendet, um bei einem Fehler auf einem System, über das verbleibende Kabelsystem einen Weiterbetrieb sicherzustellen. Der Weiterbetrieb mit einem Kabelsystem birgt gleichzeitig die Grundlage für die Variante B. In dem eigentlichen Verteilnetz werden keine Veränderungen vorgenommen.

Szenario A: Realisierung zweier Kabelsysteme 10 kV

Grundlage für die Auswahl des Kabels ist die Strombelastbarkeit. Hierbei soll die Auslastung des Kabels bei Ausfall eines Systems unterhalb von 70% des Nennstromes liegen. Dieses wird häufig als EVU-Last eines Kabels angegeben [6]. Der sich aus der Lastflusssimulation (10 kV), ergebene Strom für die Anbindung des UW 2 beträgt 350 A. Für diesen Strom ist ein Mittelspannungskabel Typ N2XS(F)2Y mit einem Querschnitt von 240 mm^2 ausreichend. Dieses hat einen thermischen Grenzstrom von 526 A bei 20°C und Bündel-Anordnung [7]. Es ergibt sich eine Kabelauslastung von 67%. Bei genauerer Betrachtung der Listenpreise und dem Vergleich mit dem nächsthöheren Querschnitt (300 mm^2), ist es sinnvoll, aufgrund der geringen Mehrkosten und der höheren Strombelastbarkeit,

den höheren Querschnitt zu wählen [8]. Wird nun die Simulation um diesen Kabeltyp und Querschnitt ergänzt, so ergibt sich eine Kabelauslastung von 59%. Durch den Ansatz von zwei Systemen ergibt sich aus der Simulation eine Kabelauslastung von 29% je Kabelsystem. Das bedeutet für diese Variante, dass die Kabel einen großen Sicherheitsabstand, zu der EVU-Last (70%) besitzen. Ebenfalls sind die Kabel keiner übermäßigen Alterung durch Stromwärme ausgesetzt [7]. Die Ergebnisse der Kabelauslastung sind in Abbildung 3 dargestellt.

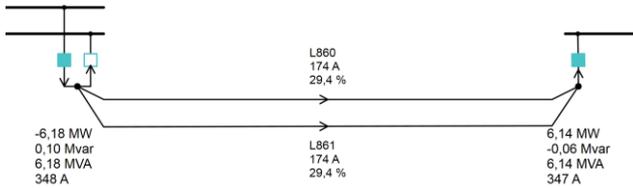


Abb. 3: Doppelkabel für die Stützpunktstation

Szenario B: Realisierung eines Kabelsystems 10 kV

Aus der Variante A, mit einem Doppelkabel, leitet sich die zweite Variante B ab, eine Realisierung mit einem Kabelsystem. Das Mittelspannungskabel in dieser Variante ist mit einer Auslastung von 59% ebenfalls unterhalb der EVU-Last (70%) und der Maximallast im gestörten Betrieb (120%) [6], [9]. Die Auslastung des Einfachkabels ist in der Abbildung 4 dargestellt.

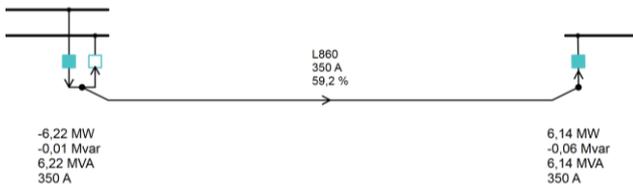


Abb. 4: Einfachkabel als Einspeisung für die Stützpunktstation

Die (n-1)-sichere Versorgung wird in diesem Fall über das 10-kV-Verteilnetz gewährleistet. Die offenen Trennstellen in der Strangstruktur werden hierzu geschlossen. Anschließend wird diese durch die Simulation überprüft. Sollte das Mittelspannungskabel, welches die Stützpunktstation versorgt ausfallen, ist es nicht möglich alle Lasten in dem Teilnetz zu versorgen. Die vorhandenen Kabel werden mit bis zu 166% belastet. Dieses führt zu einer irreversiblen Schädigung der Kabel. Somit ist es technisch nicht möglich die (n-1)-sichere Versorgung sicher zustellen.

IV. ERGEBNISSE

Die beiden Varianten der Netzoptimierung werden in PSS®Sincal verändert und angepasst. Die Ergebnisse der Berechnungen werden anschließend dem Programm entnommen und in diesem Abschnitt dargestellt. Als Ausgangszustand gilt der in Abschnitt III beschriebene Netzzustand und die hierzu gehörenden Netzverluste.

In der Variante A gibt es an keinem Knoten im Netz eine Spannungsbandverletzung. Die Spannungen liegen im Bereich von 99,1% – 103,1%, es ergibt sich ein maximales

Spannungsdelta von 4,0%. Die geringste Knotenspannung ist um 0,2% kleiner als in dem Ursprungsnetz.

Für die Variante B wird ebenfalls die Spannung an allen Knoten im Netz eingehalten. In diesem Fall liegt die Spannung in dem Bereich von 98,6% – 103,1%, es ergibt sich ein Spannungsdelta von 4,5%. Die geringste Knotenspannung ist um 0,7% kleiner im Vergleich zum Ursprungsnetz.

In der Variante A ergeben sich Netzverluste von 834 kW, diese sind um 16 kW geringer als in dem Ursprungsnetz. Dieses lässt sich auf den nicht mehr benötigten Transformator in dem UW 2 zurück zu führen. Die Verluste der 30-kV-Kabelverbindung und die Umspannverluste des Transformators 30/10 kV kompensieren die Verluste des 10-kV-Doppelkabels. Der (n-1)-sichere Betrieb ist bei Ausfall eines Kabels über das verbliebene Kabel gesichert.

In der Variante B ergeben sich Netzverluste von 872 kW diese sind um 22 kW höher als die Verluste des Ursprungsnetzes. Dieses lässt sich auf das höher belastete 10-kV-Verbindungskabel zurückführen. Dieser Betriebszustand des Netzes repräsentiert eine kostengünstigere Realisierung mit einem Einfachkabel oder den gestörten Betriebsfall der Variante A.

V. AUFSTELLUNG DER MATERIALKOSTEN

In diesem Abschnitt werden die anzusetzenden Kosten aufgestellt. Diese Kosten sind reine Materialkosten der Kabel. Die Materialkosten für die Kabel setzen sich jeweils aus den Hohlkosten und dem Kupferzuschlag zusammen [8]. Die Kosten für die Verlegung der Kabel werden in allen Varianten, aufgrund der gleichen Wegstrecke, annähernd die gleiche Höhe aufweisen. Für den weiteren Vergleich der Varianten werden diese Kosten nicht weiter berücksichtigt.

A. Ersatz und Weiterbetrieb des Ursprungsnetzes

Für den Fall des Weiterbetriebs der Mittelspannungsnetzes mit beiden Spannungsebenen (30 kV und 10 kV), müssen einige der Betriebsmittel ersetzt werden, um Ausfälle minimieren zu können. Diese wurden bereits in der Tabelle I Aufgeführt.

Für den Ersatz des 30-kV-Kabels, ergeben sich für eine Länge von 3 km und einem Querschnitt von 95 mm² rund 198 000 €. In diesen Fall müsste jedoch berücksichtigt werden, dass für eine redundante Versorgung der Umspannanlage eine weitere Kabelverbindung notwendig ist. Wird dieses ebenfalls über eine Doppelleitung realisiert, so sind Kosten mit 396 000 € anzusetzen [9], [10].

An dieser Stelle ist ein Ersatz des Transformators 30/10 kV nicht mit inbegriffen. Ebenfalls ist ein Ersatz der Schaltanlage 30 kV und 10 kV bei einer genaueren Planung mit zu berücksichtigt werden. Die "Realen" Kosten für den Weiterbetrieb beider Spannungsebenen sind somit deutlich höher anzusetzen.

B. Ersatz des 30-kV-Kabels durch ein 10-kV-Doppelkabel

Für die Realisierung mit einem Doppelkabel mit einem Querschnitt von 300 mm² sind für eine Länge von 3 km Materialkosten von ca.: 446 000 € anzusetzen [9], [10].

Gegebenenfalls ist hier für weitere Planungen ein Ersatz der 10-kV-Schaltanlage mit zu berücksichtigen.

C. Ersatz des 30-kV-Kabels durch ein 10-kV-Kabel

Für die Realisierung mit einem Kabel mit einem Querschnitt von 300 mm², halbieren sich die Kosten. Es sind Kosten von ca.: 223 000 € anzusetzen [9], [10]. Ebenfalls ist hier der Ersatz der 10-kV-Schaltanlage für weitergehende Planungen mit zu Berücksichtigen.

VI. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Simulationen mit dem Programm PSS@Sincal haben ergeben, dass die Materialkosten für den Weiterbetrieb, mit dem Ersatz des 30-kV-Kabels und dem Ersatz des Kabels durch ein 10-kV-Kabel (Variante B), ungefähr die gleiche Höhe haben. Die Netzverluste sind bei Betrieb über das 10-kV-Einfachkabel um nur 22 kW höher als bei Weiterbetrieb mit 30-kV-Kabel. Jedoch fallen bei Weiterbetrieb zusätzliche Kosten für den Ersatz des Transformators 30/10 kV und eventuell zu ersetzende Schaltanlagen an.

Die Variante A hat im Vergleich zu dem Ursprungsnetz und der Variante B die geringsten Netzverluste, jedoch sind die Kosten das 10-kV-Doppelkabel mehr als doppelt so hoch. Die Netzverluste betragen in dieser Variante 834 kW das entspricht 16 kW weniger als im Ursprungsnetz. Der weitere Vorteil in dieser Variante besteht darin, dass bei einem zukünftigen Wegfall der 30-kV-Ebene ein Weiterbetrieb möglich ist. Es muss gegebenenfalls die 10-kV-Schaltanlage, altersbedingt ersetzt werden, jedoch ist dieses auch in allen weiteren Varianten nötig. Desweiteren lässt eine Reduzierung der Netzverluste auf eine Verringerung der variablen Betriebskosten schließen. Der Wegfall der 30-kV-Ebene birgt noch einen weiteren Vorteil, der Platzbedarf für Schaltanlage und Transformator (30 kV) entfällt.

Bei Betrachtung der Ausfallsicherheit ist ebenfalls die Variante A im Vorteil. Da hierbei die elektrische Energie über das verbliebene Kabel übertragen werden kann. In dem Ursprungsnetz wird die (n-1)-sichere Versorgung über die 30-kV-Ringleitung sichergestellt, hierbei ist jedoch nicht sicher wie weit die Spannungsebene in Zukunft erhalten bleibt. Die Variante B scheidet aufgrund der nicht gegebenen Ausfallsicherheit der Kabelstecke aus.

Abschließend ergibt die Variante A die meisten Vorteile, da die Netzverluste hierbei auf ein Minimum reduziert werden können und die Realisierung in der gleichen Spannungsebene wie das Verteilnetz umgesetzt werden kann. Es fallen somit keine aufwendigen Umbau- oder Erneuerungsmaßnahmen in der 30-kV-Ebene an. Wird die Ausfallsicherheit (n-1) mitberücksichtigt und ein Weiterbetrieb des Netzes angestrebt, kann es nötig sein die bestehende 30-kV-Kabelstrecke als Doppelkabel auszulegen. Dann ergeben sich Kosten von 396 000 €. Die Variante A ist hierbei lediglich mit 50 000 € höheren Kosten anzusetzen. Für den Weiterbetrieb fallen gegebenenfalls Kosten für den Ersatz des Transformators 30/10 kV und der Schaltanlage 30 kV an.

REFERENCES

- [1] EnWG, Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz), § 11 Abs. (1), 07.07.2005
- [2] K. Panos, *Praxishandbuch Energiewirtschaft*, 3. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [3] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme*, 3. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- [4] J. Schlabbach, D. Metz, *Netzsystemtechnik*, J.Schlabbach, Berlin: VDE-Verlag, 2005.
- [5] ABB AG, *Schaltanlagen Handbuch*, 12. Aufl., Hrsg., S. Kämpfer und G. Kopatsch, Berlin: Cornelsen, 2011.
- [6] DIN VDE, DIN EN 50464-1:2012-06
- [7] M. Kliesch, F. Merschel, *Starkstromkabelanlagen*, R. R. Cichowski, 2. Aufl., Frankfurt a. M.: EW Medien und Kongresse, 2010.
- [8] Nexanas Deutschland GmbH, [Online], http://www.nexans.de/service/Germany-de_DE/navigate_229026/N2XS_F_2Y_RM_6_10_kV.html, Zugriff: 24.10.2014.
- [9] Helukabel GmbH, [Online], http://www.helukabel.de/de/de/produkte/produkte_detail.html?j_language=de&productKey=STD%5c_STD_32560, Zugriff: 14.10.2014.
- [10] Helukabel GmbH, [Online], http://www.helukabel.de/de/de/service/metallnotierung/service_metallnotierung.html, Zugriff: 14.10.2014.