

# Studiengang Systemtechnik

Vertiefungsrichtung Power & Control

# Bachelorarbeit Diplom 2017

*Dominic Kimmig*

*Längsspannungsregler unter Last in einer  
ländlichen Mittelspannungsleitung*


- *Dozent/in*  
Davide Pavanello
- *Experte/Expertin*  
Aurélien Lair
- *Datum der Abgabe des Schlussberichts*  
18.08.2017

Es handelt sich um den Originalbericht des/der Studierenden.  
Er wurde nicht korrigiert und kann deshalb Ungenauigkeiten oder Fehler enthalten.

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang <b>SYND</b>	Année académique / Studienjahr <b>2016/2017</b>	No TD / Nr. DA <b>pc/2017/61</b>
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student <b>Dominic Kimmig</b>  Professeur / Dozent <b>Davide Pavanello</b>	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <sup>1</sup> <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) <b>Aurélien Lair</b> Romande Energie SA - Rue de Lausanne 53 - 1110 Morges Tél: +41 21 802 97 22 <a href="mailto:aurelien.lair@romande-energie.ch">aurelien.lair@romande-energie.ch</a>	

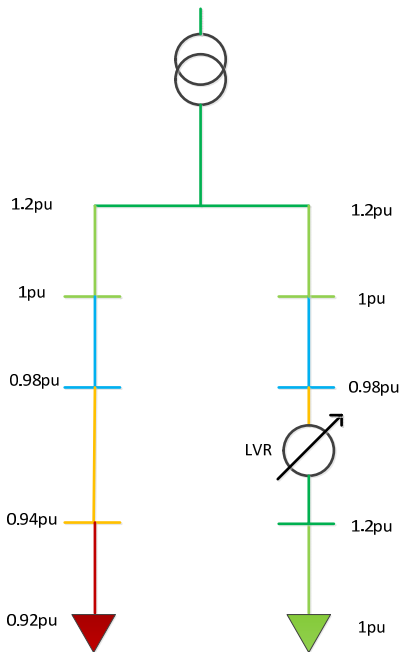
Titre / Titel <b>Längsspannungsregler unter Last in einer ländlichen Mittelspannungsleitung</b>
Description / Beschreibung  Das Niederspannungsversorgungsnetz ist stellenweise mit dem Problem der delikaten Aufrechterhaltung der Spannungshöhe konfrontiert. Je nach Gleichgewicht zwischen Produktion und Verbrauch muss die Spannung nach oben oder unten korrigiert werden. Dieser Mechanismus ist in ländlichen Gegenden mit Stickleitungen einfacher zu bewältigen. Es wird eine Regelstrategie benötigt, um zu verhindern, dass die genehmigten Grenzwerte überschritten werden. Ziel dieser Arbeit ist die Beurteilung des technischen und finanziellen Interesses einer Regellösung, die auf einem Längsspannungsregler in einer Mittelspannungsleitung des Netzwerks der Romande Energie beruht.
Objectifs / Ziele <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleichende theoretische Analyse der Funktionsweise und der möglichen Regelmöglichkeiten mittels eines Laststufenschalters (OLTC) und eines Längsspannungsreglers (AVR).</li> <li>- Feinmodellierung mithilfe der Software DigSILENT Powerfactory eines Teils des Mittelspannungsnetzes, der mit einem Spannungsregler ausgestattet werden könnte. Vergleich der Effizienz der beiden Lösungen (OLTC vs. AVR), die im vorgehenden Punkt untersucht wurden, für verschiedene Lastszenarios am Ende der Leitung.</li> <li>- Vergleichende Finanzanalyse zwischen den betrachteten Regellösungen und einem konventionellen Ausbau der Leitung.</li> </ul>

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum  Responsable de l'orientation / filière <i>Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:</i>  .....   <sup>1</sup> Etudiant / Student :  ..... 	Délais / Termine  Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: <b>15.05.2017</b>  Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation <b>08 – 09.06.2017</b>  Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: <b>18.08.2017 / 12h00</b>  Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: <b>30.08 – 31.08 – 01.09.2017</b>  Défense orale / Mündliche Verfechtung: <b>Semaine 36 / Woche 36</b>
--	--

<sup>1</sup> Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.  
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

# Längsspannungsregler unter Last auf einer Mittelspannungsleitung

Diplomand Dominic Kimmig



## Ziel des Projekts

Auf das in einem Mittelspannungsverteilstnetz der Romande Energie aufkommende Problem der Überschreitung der Spannungsgrenzwerte gilt es eine Lösung vorzuschlagen.

## Methoden | Experimente | Resultate

In einem ersten Teil der Arbeit wurden verschiedene Arten der Spannungsregelung untersucht um daraus eine geeignete zu finden, die im Verteilnetz der Romande Energie eingesetzt werden könnte um die Spannungsgrenzwerte zu garantieren.

In einem zweiten Teil wurde eine Modellierung des Verteilnetzes mithilfe des Programms DiGSILENT Powerfactory vorgenommen um dessen Verhalten zu studieren.

Danach wurde das Modell den zukünftigen Lasten angepasst und verschiedene potenzielle Lösungen um die Spannungsprobleme zu beheben wurden erarbeitet und anschliessend im Modell simuliert. Eine Auswertung der Simulationen und eine Finanzanalyse der diversen Systeme erlaubte es, diese untereinander zu vergleichen und aus ihnen das geeignetste auszuwählen.

Als am besten in Frage kommende Lösung um die die Spannungsniveaus zu halten, wurde ein Einsatz von zwei Längsspannungsreglern (LVR) auf zwei unterschiedlichen Leitungen gefunden. Damit auch bei einem Ausfall eines beliebigen Leitungsabschnitts die Versorgung sämtlicher an das Verteilnetz angeschlossene Bezüger garantiert ist, ist ein ergänzender Neubau eines Leitungsabschnittes nötig.

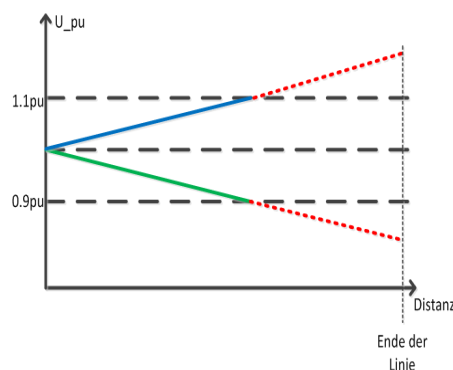
Diplomarbeit  
 | 2017 |

Studiengang  
 Systemtechnik

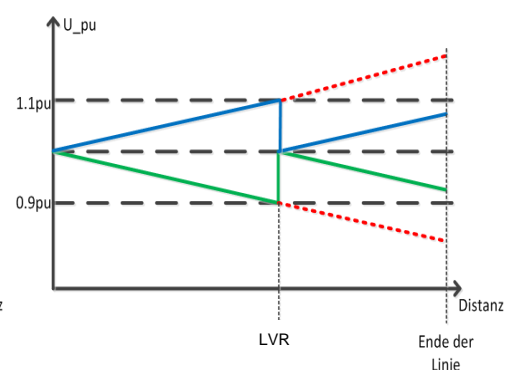
Anwendungsbereich  
 Power&Control

Verantwortlicher Dozent  
 Dr Davide Pavanello  
 davide.pavanello@hevs.ch

Partner  
 Romande Energie SA



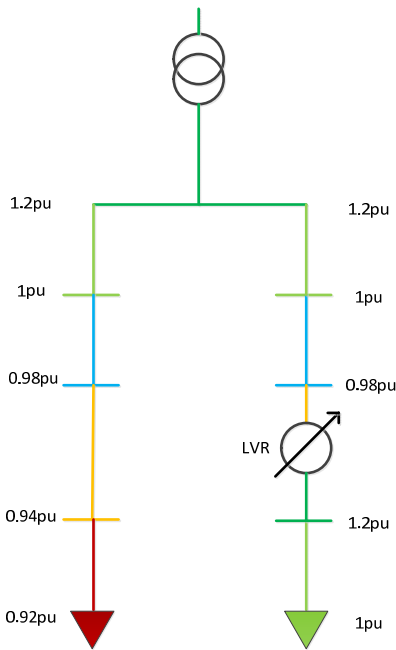
Spannungsverlauf auf einer MS-Linie ohne LVR



Spannungsverlauf auf einer MS-Linie mit einem LVR

# Régulateur de tension sous charge dans une ligne à moyenne tension

Diplômant **Dominic Kimmig**



## Objectif du projet

Le but de ce travail est de proposer une solution pour répondre à la problématique de la chute de tension qui se produit en fin de ligne et qui est en train d'influencer une partie du réseau de la Romande Energie d'une manière trop forte.

## Méthodes | Expériences | Résultats

Dans un premier temps, différents systèmes de régulation de tensions ont été analysés afin d'en trouver un qui pourrait être apte à garantir les limites de tensions fixées sur une partie spécifique du réseau.

Dans une deuxième partie, une modélisation de la partie sensible du réseau a été réalisée avec le logiciel DigSILENT Powerfactory pour analyser son comportement.

Ensuite le modèle a été adapté en prévision des charges futures et différentes solutions permettant de résoudre les problèmes de tension ont été simulées dans le modèle. L'étude des simulations et l'analyse financière des différentes solutions proposées a permis d'en déterminer la meilleure.

La solution la plus adaptée est, premièrement, l'ajout de deux compensateur seriels (LVR) sur deux lignes différentes afin de garantir les niveaux de tensions, et deuxièmement la création d'une nouvelle section de ligne garantissant l'alimentation des consommateurs en cas de default sur la ligne.

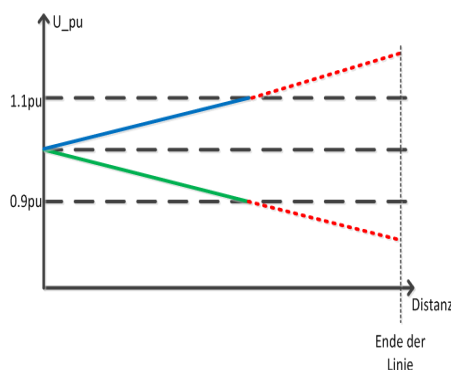
Travail de diplôme  
 | édition 2017 |

Filière  
 Systèmes industriels

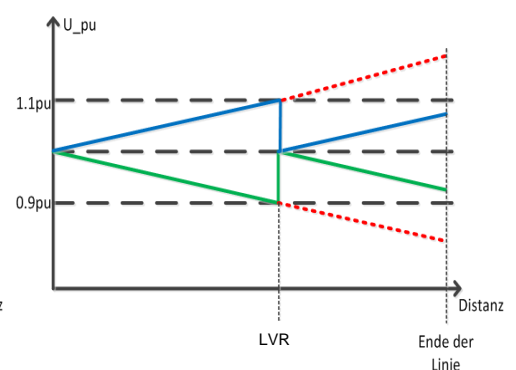
Domaine d'application  
 Power & Control

Professeur responsable  
 Davide Pavanello  
 davide.pavanello@hevs.ch

Partenaire  
 Romande Energie SA



Tension sur une ligne à moyenne tension sans LVR



Tension sur une ligne à moyenne tension avec LVR

## Inhaltsverzeichnis

1	Kontext .....	8
1.1	Problemstellung und Ziel der Arbeit .....	8
1.2	Technische Angaben zum Projekt .....	9
2	Mögliche Lösungsansätze.....	11
2.1	Netzausbau .....	11
2.2	Spannungsregelung am Transformator.....	11
2.3	Spannungsregelung einer einzigen Linie .....	11
2.3.1	Shunt Kompensation .....	12
2.3.2	Serie Kompensation .....	15
2.3.3	Combined Compensators.....	18
2.4	Längsspannungsregler .....	20
2.4.1	Spartransformator vs. Konventioneller Transformator .....	20
2.4.2	Bauarten.....	22
2.4.3	Auswahl geeigneter Bauarten .....	26
2.5	Auswahl der geeigneten Systeme .....	28
3	Modellierung und Simulationen .....	29
3.1	Modellierung des Netzes.....	29
3.2	Netzanpassung .....	30
4	Spannungskorrektur.....	31
4.1	Spannungskorrektur Vièze-90 .....	32
4.1.1	Netzoptimierung .....	32
4.1.2	Netzverstärkung .....	34
4.1.3	Netzausbau.....	34
4.2	Spannungskorrektur Vièze-91 .....	36
4.2.1	Netzoptimierung .....	36
4.2.2	Netzverstärkung .....	37
4.2.3	Netzausbau.....	37
4.3	Kombinierende Spannungskorrekturen .....	39
4.3.1	Netzoptimierung / -verstärkung .....	39
4.3.2	Netzausbau.....	40
4.4	Garantieren der Speisung der Station CROSETS 8 im Notbetrieb.....	44
4.5	Zusammenfassung geeigneter Lösungen und Kosten.....	45
5	Schlussfolgerung .....	48
6	Danksagung .....	49

7	Selbstständigkeitserklärung .....	49
8	Abbildungsverzeichnis.....	50
9	Tabellenverzeichnis .....	50
10	Literaturverzeichnis.....	51
11	Anhang .....	52

# 1 Kontext

Die Netzbetreiber sind an manchen Orten mit dem Problem der Einhaltung des Spannungsbands, das durch die Norm EN 50160 auf  $\pm 10\%$  im Normal- und  $+10\% / -15\%$  im Notbetrieb der Nennspannung definiert ist, konfrontiert. Aufgrund der Veränderungen zwischen Gleichgewicht von Verbrauch und Produktion kann das Spannungsband nicht mehr immer eingehalten werden. Diesem Problem kann in ländlichen Stickleitungen einfacher begegnet werden. Es werden Regelstrategien auf der Ebene der Mittelspannung gesucht, mit denen die Grenzwerte eingehalten werden können.

## 1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

In einem Verteilnetz der Firma Romande Energie besteht das Problem der Überschreitung der Spannungsgrenzwerte. Konkret handelt es sich um die Mittelspannungsleitung welche in das Val d’Illiez führt. Hier tendiert die Spannung bei PLANACHAUX C am Ende der Linie Viez-90 (grün) die Spannungslimiten zu unterschreiten. Dies ist zu verhindern. Gemäss vorangegangenen Messungen des Auftraggebers tendieren die Spannungen zu Spitzenzeiten im Winter die Limiten nicht einzuhalten. Dieses Problem verstärkt sich mit dem Lastzuwachs von 1% jährlich, den Romande Energie in den nächsten Jahren auf diesem Teil ihres Netzes erwartet.

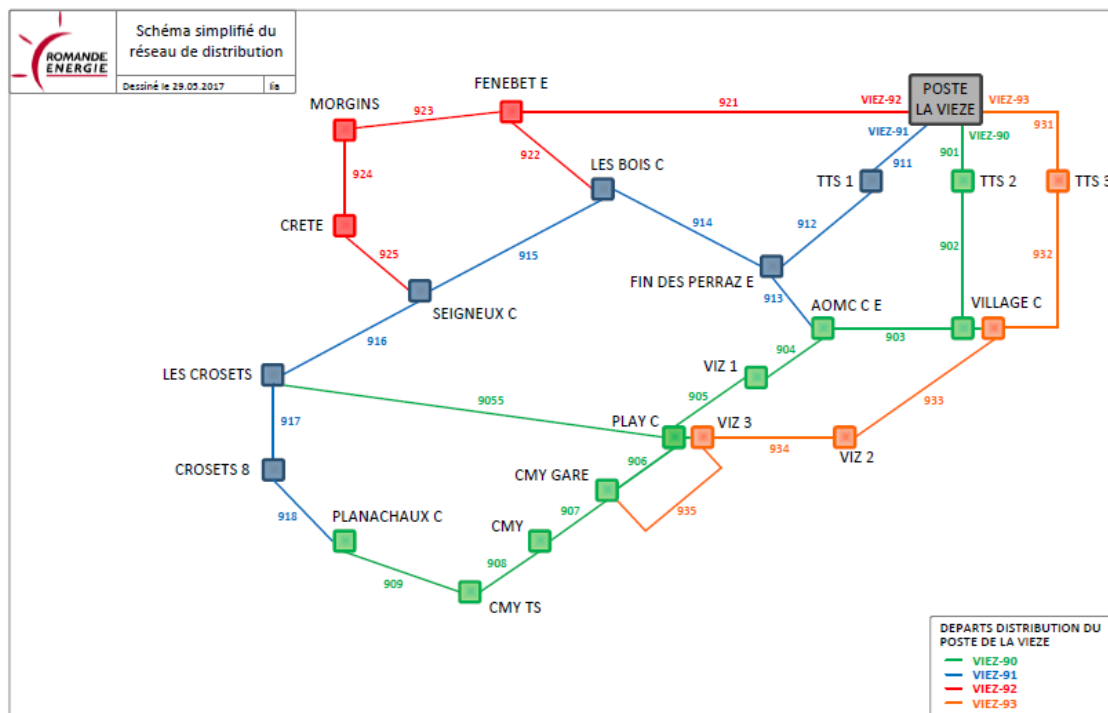


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Verteilnetzes im Val d’Illiez (Romand-Energie)

Um das Spannungsband einhalten zu können, gibt es verschiedene Regelmöglichkeiten die eingesetzt werden können. Ziel dieser Arbeit ist es, mögliche geeignete Lösungen für dieses Problem zu finden und unter Betrachtung der technischen und finanziellen Aspekte und unter Einhaltung der Normwerte ein geeignetes System auszuwählen. Durch Simulationen wird die Effizienz des Systems aufgezeigt. Hauptaugenmerk liegt auf den verschiedenen



Regelmöglichkeiten mittels Einsatz eines Laststufenschalters (On-Load-Tap-Changer: OLTC) und eines Längsspannungsreglers (LVR).

Die Arbeit beinhaltet folgende Schritte:

- Beschreibung verschiedener Lösungsansätze und anschließende Auswahl eines geeigneten Systems.
- Eine Modellierung des entsprechenden Verteilnetzes wird vorgenommen.
- Das Modell des Verteilnetzes wird an die zukünftige Lastverteilung angepasst und entsprechend modifiziert.
- Mithilfe des simulierten Spannungsabfalls wird die Dimensionierung des eingesetzten Systems vorgenommen. Normal- und Notbetrieb, sowie Lage in 35 Jahren werden berücksichtigt.
- Das System wird in das Modell eingesetzt, es wird eruiert wo das System am besten zum Einsatz kommt.
- Mit verschiedenen Lastszenarios wird das Regelsystem auf seine Effizienz (Einhaltung der Normwerte) getestet. Anschliessend werden die erhaltenen Resultate diskutiert.
- Zum Abschluss wird eine vergleichende Finanzanalyse der betrachteten Regelmöglichkeiten und eines konventionellen Netzausbaus durchgeführt.

## 1.2 Technische Angaben zum Projekt

Dem Projekt liegen verschiedene technische Angaben vor.

### Vereinfachtes Schema

Für diese Diplomarbeit wurde von der Firma Romande Energie ein vereinfachtes Schema des Verteilnetzes zur Verfügung gestellt. Dieses ist samt Daten in den Anhängen 1-2 einzusehen. Das vereinfachte Schema verhält sich sehr ähnlich dem Wirklichkeitsgetreuen.

### Grenzwerte der Spannung (Normal- und Notbetrieb)

Romande Energie setzt sich für die Mittelspannungsebene MS ( $1\text{kV} < U_N < 36\text{ kV}$ ) folgende Spannungslimiten, wobei die Aussenleiternennspannung  $U_N = 16.5\text{kV}$  ist:

- Normalbetrieb:  $0.96 * U_N < U(t) < 1.02 * U_N$
- Notbetrieb:  $0.91 * U_N < U(t) < 1.02 * U_N$

Romande Energie setzt sich für die Niederspannungsebene NS ( $U_N < 1\text{ kV}$ ) folgende Spannungslimiten, wobei die Aussenleiternennspannung  $U_N = 400\text{V}$  ist:

- Normalbetrieb:  $0.94 * U_N < U(t) < 1.03 * U_N$
- Notbetrieb:  $0.94 * U_N < U(t) < 1.03 * U_N$

Es ist zwingend, dass die Grenzwerte der Spannung sowohl im Normal-, wie auch im Notbetrieb gewährleistet sind.

**Thermische Grenzwerte der Leiter (Normal- und Notbetrieb)**

Im Normalbetrieb sind die einzelnen Stränge (siehe Anhang 1) nur Stichleitungen, bzw. sie sind an ihren Enden nicht verbunden.

Im Normalbetrieb soll der Leiterstrom der MS-Ebene nach Möglichkeit auf 50% des Nennstromes  $I_N$  des Leiters beschränkt bleiben, um im Notbetrieb genügend freie Kapazitäten zu haben.  $I(t) < 0.5 \cdot I_N$  Es ist jedoch auch zulässig, dass der Strom über 50% des Nennstromes steigt, wichtig ist, dass genügend freie Kapazität für den Notbetrieb übrigbleibt.

Notbetrieb ist, wenn auf irgendeiner Leitung ein Defekt auftritt und dieser Abschnitt beidseitig abgetrennt wird. Der hintere Teil der Leitung wird nun vom anderen Strang gespeist. Somit können sämtliche Stationen gespeist werden, dies ist auch unter der (N-1)-Regel bekannt. Im Notbetrieb darf die Leitung zu 100% auf Dauer ausgelastet sein. Da die simulierten Lasten, in diesem Fall die maximal möglichen Lasten, höchstens während der Dauer von einer Stunde auftreten, dürfen die Leitungen bis zu 110% ausgelastet sein.

$$I(t) \leq 1.1 \cdot I_N$$

Es ist zwingend, dass die thermischen Grenzwerte sowohl im Normal-, wie auch im Notbetrieb gewährleistet sind.

## 2 Mögliche Lösungsansätze

### 2.1 Netzausbau

Der Ausbau des Netzes beinhaltet den Austausch der Leitung (oder zumindest einen Teil davon). Durch die Vergrößerung des Querschnitts nimmt der Widerstand der Leitung ab, was wiederum zu einem geringeren Spannungsabfall führt. Im Idealfall reicht dieser verringerte Spannungsabfall aus, damit die Normwerte der Spannung am Ende der Leitung nicht über- bzw. unterschritten werden. Da das spezifische Netz über Frei- und Bodenleitungen verfügt, birgt ein konventioneller Netzausbau hohe Kosten. Weiter ist die Wirksamkeit dieser Massnahme beschränkt effizient und wenig flexibel in Bezug auf zukünftige Änderungen der Netzlast.

### 2.2 Spannungsregelung am Transformator

Soll die Spannung direkt variiert werden können, ist die Installation eines Spannungsreglers nötig. Es gibt viele verschiedene Prinzipien die hierfür angewendet werden können. Einige davon arbeiten mit der Änderung des Übertragungsverhältnisses des Transformators (HS/MS) das laufend angepasst wird. Diese Systeme können jedoch nicht jedem einzelnen Strang, der vom Transformator abgeht, gerecht werden. Das gesamte Spannungsniveau aller Stränge wird angehoben oder gesenkt. Darum eignen sich diese Systeme nicht, wenn einige vom Transformator abgehende Stränge zu einem Übertritt des Spannungsnormwertes und andere Abgänge zu einem nicht Erreichen des Spannungsnormwertes tendieren. Es wird riskiert dass nicht alle Stränge die Bedingungen einhalten können.

Eine Möglichkeit die häufig angewendet wird, ist die Installation eines Laststufenreglers (On-Load-Tap-Changer: OLTC). Da eine solche Variante bereits installiert ist, ist somit das Potenzial dieser Möglichkeit ausgeschöpft. Somit wird ihr in der weiteren Analyse keine Beachtung mehr geschenkt.

### 2.3 Spannungsregelung einer einzigen Linie

Um die Spannung auf einer einzigen Linie zu regeln, können verschiedene Lösungen in Betracht gezogen werden, wobei der Regler entlang der Übertragungsleitung installiert wird. Einige arbeiten als Transformatoren die in die Übertragungsleitung geschaltet werden und deren Übersetzungsverhältnis geändert werden kann, um die Spannung zu regeln.

Andere Spannungsregler arbeiten mit der Überlagerung einer zusätzlichen Spannung auf die Leitung mittels eines Seriekompensators. Diese Spannungsregelung kann für jeden Strang einzeln und an jedem beliebigen Ort eingesetzt werden. Die Spannungen können erhöht oder gesenkt werden. Diese Arten der Spannungsregelung werden im Kapitel der Längsspannungsregler behandelt.

Die Komponenten welche auf Basis der Leistungselektronik der AC Leistungsübertragung dienen, werden unter den FACTS (Flexible AC Transmission Systems) zusammengefasst. Einige unter ihnen dienen auch der Spannungsregelung, andere jedoch dienen weiteren Anwendungen wie zum Beispiel der Leistungsstabilisierung in Netzen, Einhaltung der thermischen Grenzen, oder der Steuerung der Leistungsflüsse in einem vermaschten Netz.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Spannungsregelung, weshalb anschliessend nur auf die Elemente eingegangen wird, die der Spannungsregelung dienen.

Die FACTS können zuerst in zwei Gruppen unterschieden werden. Solche die als Shunt-Kompensatoren und solche die als statische Serie-Kompensatoren ausgeführt sind. Nachfolgend sind einige dieser Systeme aufgelistet.

### 2.3.1 Shunt Kompensation

Bei der Shunt-Kompensation liegt der Regler parallel zu der Spannungsquelle und arbeitet als Stromquelle, die die Blindleistung auf der Leitung beeinflusst. Durch Variation des Phasenwinkels zwischen dem Strom und der Spannung wird die Blindleistung auf der Linie geregelt, womit wiederum der Spannungsabfall über einer Linie beeinflusst werden kann. Mit dieser Methode kann man die übertragbare Leistung erhöhen, das Spannungsprofil regulieren und Spannungsinstabilitäten vorbeugen. Die Stromquelle kompensiert die reaktive Komponente des Stromes teilweise oder gar total.

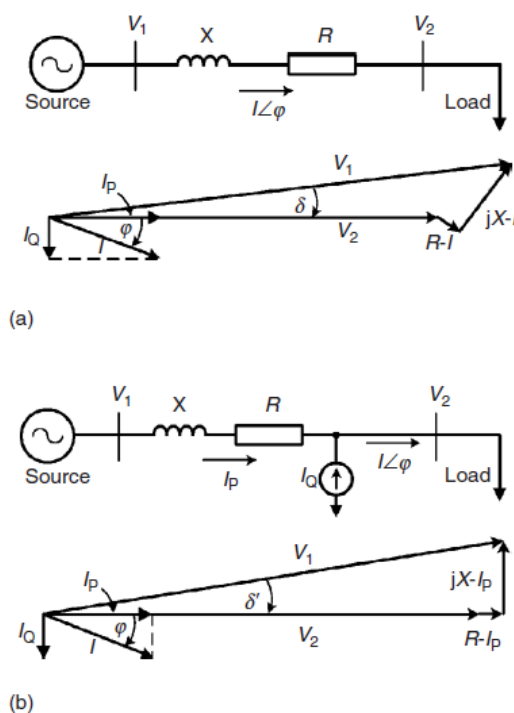


Abbildung 2 : Prinzip der Shunt-Kompensation mit a) Phasendiagramm ohne Blindleistungskompensation, b) Phasendiagramm mit Blindleistungskompensation. (Grigsby, 2006)

In Abb. 2.a) ist das System ohne Blindleistungskompensation mit zugehörigem Phasendiagramm aufgezeichnet, wobei das System vom Verbraucher ( $V_2$ ) her gesehen wird. Der Strom  $I$  ist nicht in Phase mit der Spannung  $V_2$ . Es ist zu sehen, dass für die Induktive Last Blindleistung von der Energiequelle bereitgestellt werden muss. Kann die Blindleistung nahe dem Verbraucher (Abb. 2.b) zur Verfügung gestellt werden, ist der Leitungsstrom in der Leitung in Phase mit der Spannung, damit werden die Leistungsverluste der Leitung kleiner, somit wird der Spannungsabfall über der Leitung begrenzt. Zwei typische Beispiele für den Shunt-kompensator sind der *Static var compensator* (SVC) und der *Synchronous static compensator* (STATCOM).

### 2.3.1.1 Static var compensator (SVC)

Speist einen variablen induktiven oder kapazitiven Strom ins Netz, der es erlaubt die Blindleistung zu regeln (Spannungsregelung mittels Blindleistung), dadurch findet Ein- oder Ausgangsseitig eine Phasenverschiebung statt. Der SVC ist ein Blindleistungskompensator der geregelt werden kann, wobei die Blindleistung die geregelt werden kann, relativ gering ist. Er dient der statischen und dynamischen Spannungsstabilisierung (es kann die Spannung erhöht und gesenkt werden), damit wird das Leistungsübertragungsvermögen erhöht und Spannungsschwankungen reduziert. Dynamischer Ausgleich von Lastunsymmetrien. Der SVC ist der am häufigsten eingesetzten FACTS. Das Schlüsselement des SVC ist eine Thyristorgesteuerte Kapazität oder Reaktanz. Der SVC kann in verschiedene Unterkategorien aufgeteilt werden, wobei die Hauptfunktion jeweils dieselbe bleibt (Siemens AG, 2011). Siehe dazu nachfolgende Abbildung.

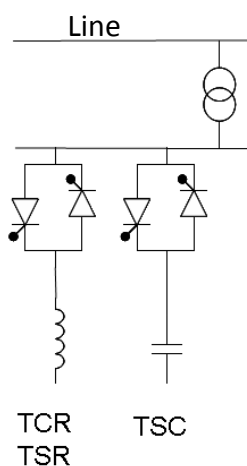


Abbildung 3 : Varianten einer SVC-Regelung (Grünbaum, Noroozian, & Thorvaldsson, 2003)

Der SVC wird für folgende Spannungen eingesetzt:  $52 \leq kV \leq 765$  (Siemens AG, 2011)

Bei folgende Leistungen lässt sich mit der SVC einsetzen:  $\sim 50 \leq MVar \leq 1000$  (Siemens AG, 2011)

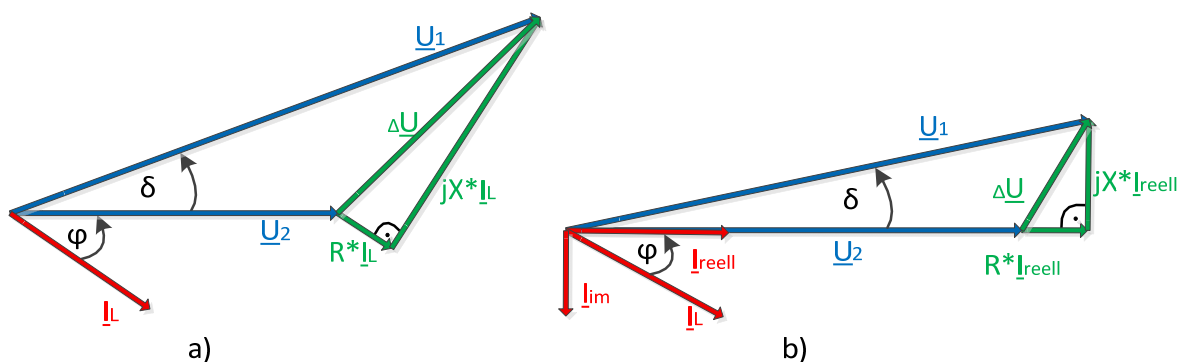


Abbildung 4 : Phasendiagramm bei a) ohne SVC und bei b) mit SVC

Durch den Einsatz des SVC reduziert sich der Strom in der Leitung auf seine reelle Komponente. Somit wird der Spannungsabfall auf der Leitung verringert, sowohl die Wirk- wie auch die reaktive Komponente. Dies ist vorangehender Abbildung (mit gleichbleibender

Eingangsspannung  $U_1$ ) zu sehen. Aufgrund der unpassenden Anwendungsgrößen und der Phasenverschiebung ist von einem Einsatz des SVC in unserem konkreten Fall abzusehen.

**2.3.1.2 Synchronous static compensator (STATCOM)**

Der STATCOM speist Blindleistung ins Netz, indem der eingespeiste Strom geregelt wird (Spannungsregelung mittels Blindleistung). Der Strom kann unabhängig der Netzspannung geregelt werden. Er entspricht einem SVC mit schnellerem dynamischen Verhalten und einer aktiven Filterung von unerwünschten Oberschwingungen und Asymmetrien.

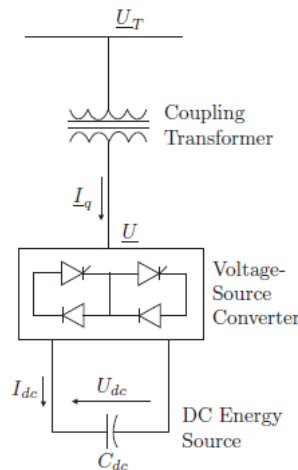


Abbildung 5 : StaticSynchronous Compensator (STATCOM)

Der SVC wird für folgende Spannungen eingesetzt:  $52 \leq \text{kV} \leq 765$  (Siemens AG, 2011)

Bei folgende Leistungen lässt sich mit der SVC einsetzen:  $\sim 50 \leq \text{MVar} \leq 500$  (Siemens AG, 2011)

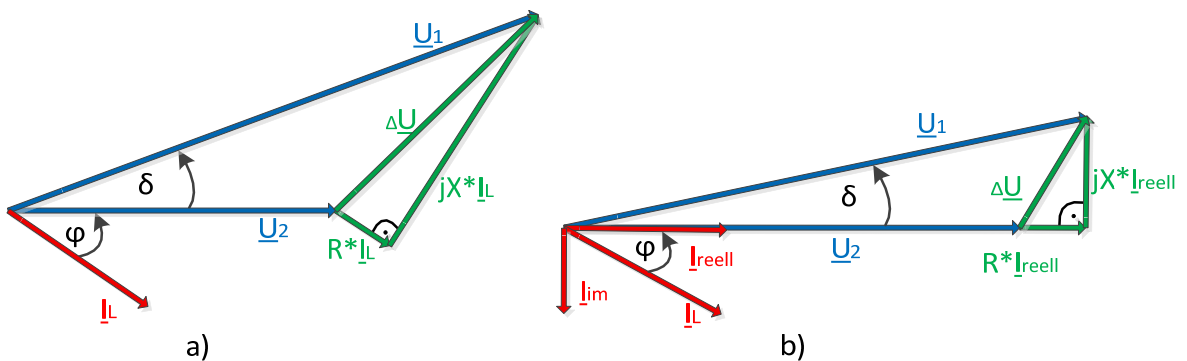


Abbildung 6 : Phasendiagramm bei a) ohne STATCOM und bei b) mit STATCOM

Durch den Einsatz des STATCOM reduziert sich der Strom in der Leitung auf seine reelle Komponente. Somit wird der Spannungsabfall auf der Leitung verringert, sowohl die Wirk- wie auch die reaktive Komponente. Dies ist vorangehender Abbildung (mit gleichbleibender Eingangsspannung  $U_1$ ) zu sehen. Das Phasendiagramm entspricht demjenigen mit der SVC-Regelung.

Aufgrund der unpassenden Anwendungsgrößen und der Phasenverschiebung ist von einem Einsatz des STATCOM in diesem konkreten Fall abzusehen.

### 2.3.2 Serie Kompensation

Bei der Serie-Kompensation liegt der Regler in Serie zu der Spannungsquelle und kann dazu gebraucht werden, um die Spannung zu kontrollieren (und damit den Strom sowie der Leistungsfluss) und Leistungsschwingungen zu dämpfen. Die Serie-Kompensation wird oft gebraucht, um in vermaschten Netzen die Leistungsflüsse zu kontrollieren (Omlin, 2012). Seriiekompensatoren sind als Spannungsquellen ausgeführt. Für diese Anwendung sind Seriiekompensatoren um einiges besser geeignet als die Shunt-Kompensatoren. Die Spannungsregelung erfolgt mehrheitlich indirekt über die Blindleistungsregelung. Typische Beispiele sind der *Fixed and thyristor-controlled series capacitor (TCSC)*, *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)* und *Phase Angle Regulator (PAR)*.

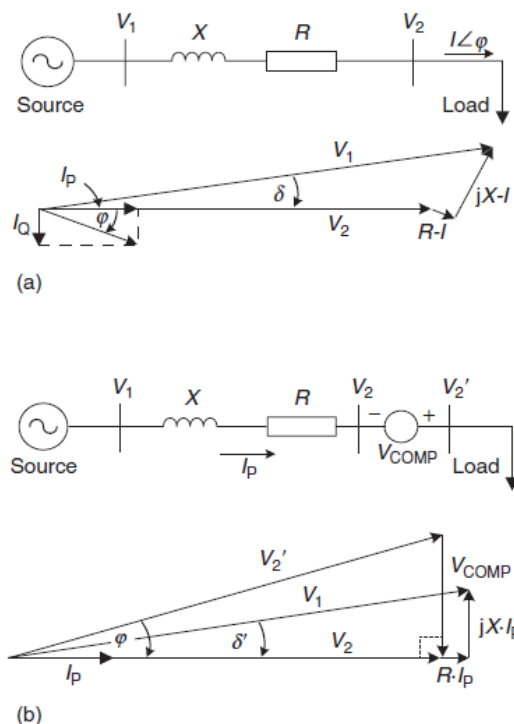


Abbildung 7 : Prinzip der Seriiekompensation mit a) Phasendiagramm ohne Seriiekompensator, b) Phasendiagramm mit Seriiekompensator. (Grigsby, 2006)

Das Prinzip der Seriiekompensation ist der der Shunt-Kompensation insofern verschieden, da die Spannung über dem Seriiekompensator der Leitung überlagert wird. Somit kann die Spannung über dem Verbraucher geändert werden. Mit der richtigen Amplitude und der richtigen Phasenverschiebung kann die Verbraucherspannung gleich gross sein wie die der Spannungsquelle (Siehe Abb. 6.b). Mit diesem System kann der Leiterstrom nicht direkt kontrolliert werden, dies muss über die Spannungsregelung beeinflusst werden.

### 2.3.2.1 Fixed and thyristor-controlled series capacitor (TCSC)

Der TCSC ist in der Lage die Reaktanz der Leitung zu verändern. Er dient der Dämpfung von Leistungspendelungen in Netzen (Unterdrückung von Resonanzen bezüglich der Spannung und des Phasenwinkels). Er kann auch zur Spannungserhöhung oder Spannungsreduktion auf einer Linie eingesetzt werden, jedoch ist er zur Spannungsreduktion weitgehend ungeeignet, da er die Sinusform der Spannung verzerrt. (Glanzmann, 2005)

Der TCSC wird hauptsächlich für Hochspannungsübertragungsleitungen eingesetzt und kann für Leistungen bis ca. 500 MVar eingesetzt werden (Romand-Energie). In vermaschten Netzen kann er dazu dienen den Leistungsfluss zu steuern.

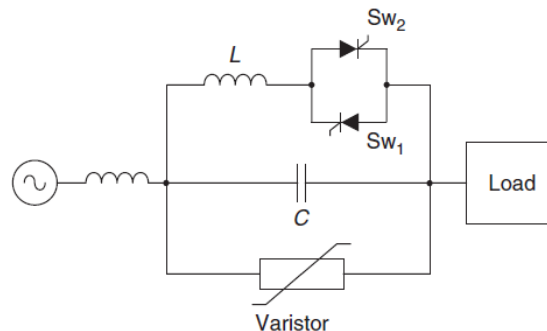


Abbildung 8 : Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) (Grigsby, 2006)

### 2.3.2.2 Phase Angle Regulator (PAR)

Phasenschieberregler (PAR) arbeiten mit dem Prinzip der Phasenschiebung (wie auch der Phasenschieber-Transformator PST) und werden in Serie mit der Leitung eingebaut. Dieses Prinzip kann mit den anderen Arten von Seriemarkompensatoren nicht angewandt werden. Die Spannung kann nur indirekt über die Blindleistung geregelt werden. Hauptanwendung ist die Regelung der übertragenen Wirkleistung, unabhängig der (dynamischen) Leitungs- und Netzreaktanz durch Änderung des Lastwinkels  $\delta$ . Des Weiteren ist ein Phasenschiebertransformator rund doppelt so teuer wie ein herkömmlicher zwei-Wicklungstransformator. Er kann für Leistungen bis ca. 2500 MVar eingesetzt werden (Romand-Energie).

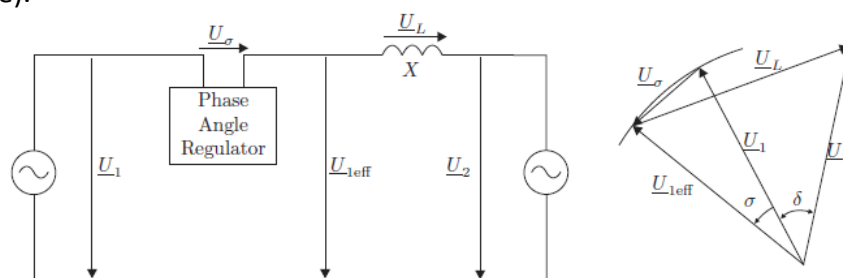


Abbildung 9 : Phase Angle Regulator (PAR) (Glanzmann, 2005)

Ein dem PAR ähnliches Beispiel ist der Quadrature-Booster. Dieser arbeitet auch mit dem Prinzip der Phasenschiebung und wurde schon in einem Mittelspannungsnetz installiert (UK Power Networks, 2014). Er dient hauptsächlich der Lastflussregelung in einem vermaschten Netz (siehe folgende Abbildung) und ist daher für das Problem das diese Arbeit behandelt ungeeignet.



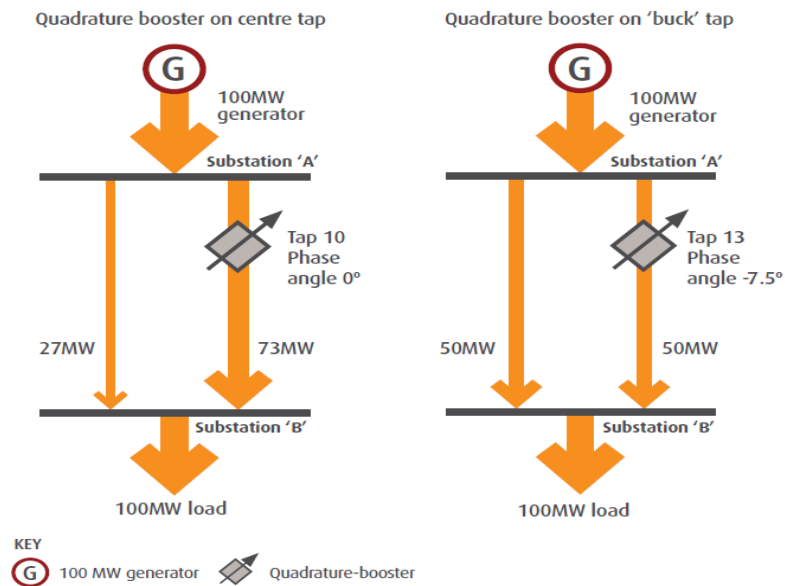


Abbildung 10: Quadrature-Booster in einem vermaschten Netz (UK Power Networks, 2014)

### 2.3.2.3 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

Dieser Seri kompensator arbeitet ohne externe Energiequelle. Ein Serietransformator arbeitet als Spannungsquelle die in Serie mit dem Ersatzwiderstand der Linie liegt. In nachfolgender Abbildung ist der schematische Einsatz eines Seri kompensators aufgezeigt. Es ist zu beachten dass die vom Seri kompensator generierte Spannung  $U_q$  dem Strom  $I$  um  $90^\circ$  phasenverschoben ist. Die induzierte Spannung ist unabhängig vom Strom  $I$ . Sind Spannung und Strom nicht um  $90^\circ$  verschoben, benötigt es eine interne Energiequelle zur Zwischenspeicherung der Energie. Diese Schaltung eignet sich sehr gut um die Spannung auf einer Übertragungslinie zu regeln und wird mehrheitlich in vermaschten Netzen eingesetzt, um die Lastflüsse zu steuern.

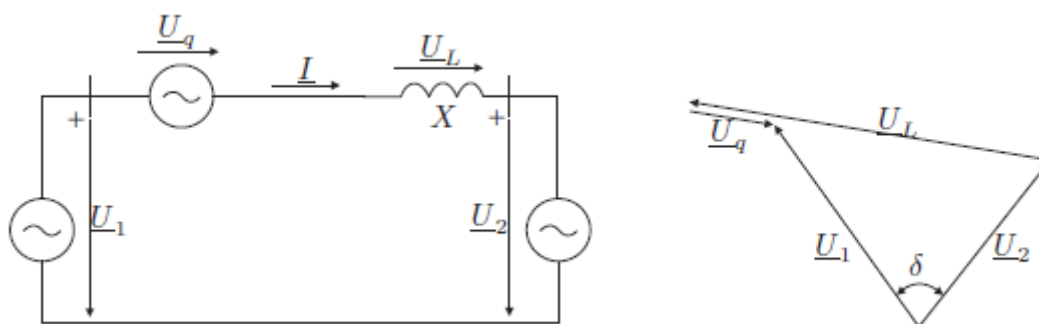


Abbildung 11: Schematischer Einsatz eines Seri kompensators mit entsprechendem Phasendiagramm (Glanzmann, 2005)

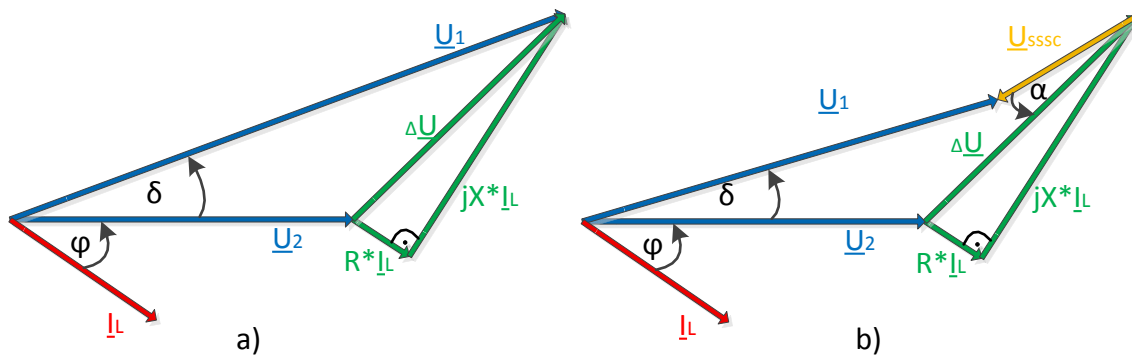


Abbildung 12 : Phasendiagramme bei a) ohne Einsatz von SSSC und bei b) mit SSSC

In oben stehender Abbildung ist ersichtlich, dass mit Einsatz des SSSC eine variable Spannung hinzuaddiert wird, die je nach Ausführung des SSSC mit dem Winkel  $\alpha$  verschoben werden kann. Somit kann die Amplitude der Ausgangsspannung ( $U_2$ ) und der Lastwinkel  $\delta$  sehr gut verschoben werden. Dieses System ähnelt in seiner Wirkungsweise dem, in einem späterfolgenden Kapitel, behandelten Längsspannungsregler der Bauart 4. Die beim SSSC eingesetzte Leistungselektronik ist jedoch relativ teuer. Ähnlich wie die vorangegangenen Systeme ist auch dieses hauptsächlich für Hochspannungsleitungen anwendbar. Damit scheidet es als Lösung für unser Problem aus.

### 2.3.3 Combined Compensators

Sowohl Shunt-Kompensatoren als auch Serie-Kompensatoren haben ihre Vor- und Nachteile. In dem man beide kombiniert, wird versucht eine den Umständen besser entsprechende Schaltung zu definieren. Die Shunt-Kompensatoren regeln die Spannung an ihrem Anschlusspunkt mit Einsatz von Blindleistungen sehr effektiv, effektiver als Seriensempensatoren. Dies aufgrund der Topologie der Schaltung. Die Serie-Kompensatoren sind bezüglich des Preis-Leistungsverhältnisses um einiges effizienter. Aus diesen Gründen ist es oft vorteilhaft eine Kombination beider Schaltungsarten anzustreben. Eine dieser Möglichkeiten ist nachfolgend aufgelistet.

#### 2.3.3.1 Unified power flow controller (UPFC)

Der UPFC besteht aus einer Kombination zwischen dem Seriensempensator SSSC und dem Shunt-Kompensator STATCOM und fungiert als AC-AC Konverter. Er kann beidseitig beliebig Blindleistung aufnehmen oder abgeben und die Wirkleistung kann zwischen beiden Seiten des Konverters ausgetauscht werden. Der Shunt-Konverter stellt die vom Serie-Konverter verlangte Leistung bereit.

Auf der Seite des Seriensempensators kann die Ausgangsspannung definiert werden, wie auch der Ausgangsstrom und die Phasenverschiebung. Somit lassen sich die Wirkleistung und die Blindleistung effektiv definieren.

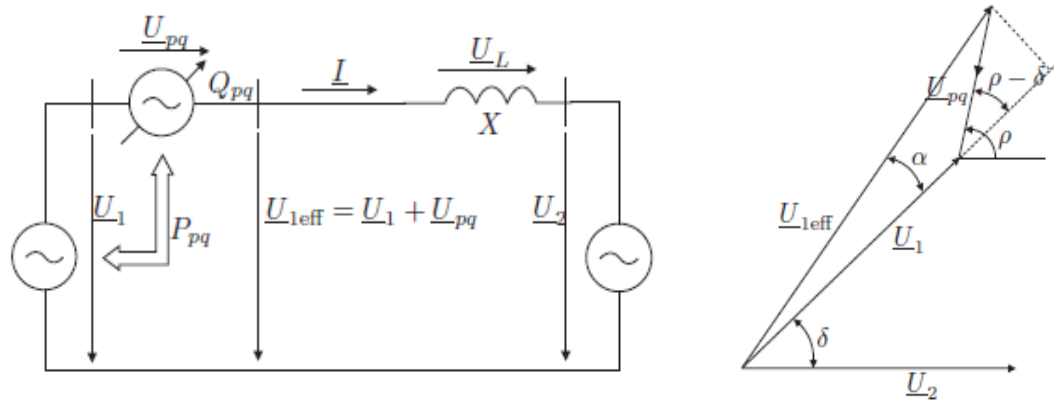


Abbildung 13 : UPFC mit zugehörigem Zeigerdiagramm (Glanzmann, 2005)

In vorangehender Abbildung ist zu sehen, dass der UPFC Ausgangsspannung, Ausgangsstrom und Phasenwinkel unabhängig voneinander steuern kann. Somit eignet er sich sehr gut als Lastflussregler in vermaschten Netzen.

Seine Regelmöglichkeiten gehen über das Verlangte hinaus, d.h. er kann viel mehr regeln als eigentlich verlangt ist. Er stellt darum nicht die geeignete Lösung des Problems dar. Daher wird er in vermaschten Netzen eingesetzt um die Lastflüsse zu steuern. Zudem liegt seine Anwendung hauptsächlich in der Hochspannungsebene.

## 2.4 Längsspannungsregler

Der Längsspannungsregler LVR ändert in der Leitung die Spannung. Diese Spannung kann je nach Schaltungsmodus positiven oder negativen Vorzeichens sein. Somit kann die Spannung nach unten und nach oben korrigiert werden. Die üblichen LVR können auf rund +/- 10% der Spannung regeln, wobei die zu regelnden Spannungen im Mittel- und Niederspannungsbereich liegen können (Carlen, Slupinski, & Cornelius, 2015). Beinhaltet der LVR keine interne Energiequelle, kann er nur die Amplitude der Spannung ( $U_{rms}$ ) beeinflussen. Die Änderung der Spannung basieren meistens auf dem Prinzip von On-Load-Tap-Changer (OLTC). OLTC bieten die Eigenschaft, dass sie unter Last die Spannung regulieren können. Ein LVR ist in einem nicht vermaschten Netz sinnvoll.

Es kann zwischen mechanischen und leistungselektronischen Schaltern unterschieden werden, wobei beim Schalten die mechanischen im Gegensatz zu den leistungselektronischen Schaltern einen Lichtbogen produzieren. Da in Zukunft mit dynamischeren Lasten (z.B. Installation von PV-Anlagen) gerechnet werden muss, geht die Entwicklung hin zu leistungselektronisch unterstützten Schaltern oder vakuumbasierten Schaltern (Harlow, 2006). Von den folgend analysierten OLTC-Topologien können sämtliche mit leistungselektronisch basierten Schaltern realisiert werden.

Gemäss *Ram, Prasanth, & Bauer, 2014* liegen hauptsächlich konventionelle Transformatoren mit zwei Windungen und Spartransformatoren zur Auswahl bereit. Die Hauptkostenfaktoren werden vorallem von folgenden Kriterien vorgegeben:

- Aufbau als Spar- oder Zwei-Windungstransformator
- Nenngrößen der Spannung und des Stromes für die Windungen des Transformators und der Schalter
- Anzahl der Schalter

### 2.4.1 Spartransformator vs. Konventioneller Transformator

Der konventionelle Transformator beinhaltet zwei Windungen, eine auf der Primärseite (hier: Hochspannungsseite HV) und eine auf der Sekundärseite (hier: Niederspannungsseite LV). Beide Seiten sind voneinander galvanisch getrennt. Siehe folgende Abbildung.

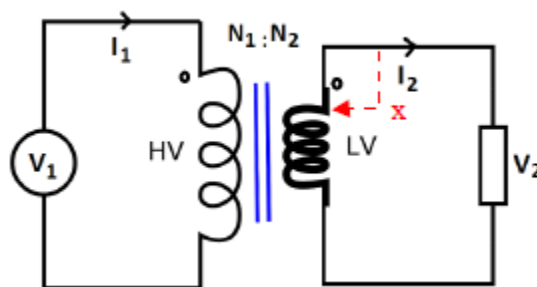


Abbildung 14: Idealer Transformator mit zwei Windungen (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014)

Im vorliegenden Fall kann auf der LV-Seite das Übersetzungsverhältnis über einen OLTC verändert werden. Es wird mit  $x$  ausgedrückt. Somit gilt:

$$V_2 = \left(\frac{V_1}{N_1}\right)x \quad I_1 = \left(\frac{I_2}{N_1}\right)x$$

Damit kann bei einer konstanten Eingangsspannung mittels eines variablen Übersetzungsverhältnisses  $x$  die Ausgangsspannung verändert werden.

Um ein eine kompaktere und günstigere Variante anzuwenden, kann ein Spartransformator benutzt werden (Harlow, 2006). Ein Spartransformator besteht aus einer einzigen Spule an der die Primär- wie auch die Sekundärseite angeschlossen ist. Darum sind die beiden Stromkreise nicht galvanisch voneinander getrennt. Je nach Anschluss des Spartransformators kann Sekundärseitig eine Spannungserhöhung (boost) oder Spannungsreduktion (buck) bezüglich der Primärseite erreicht werden. Siehe folgende Abbildung.

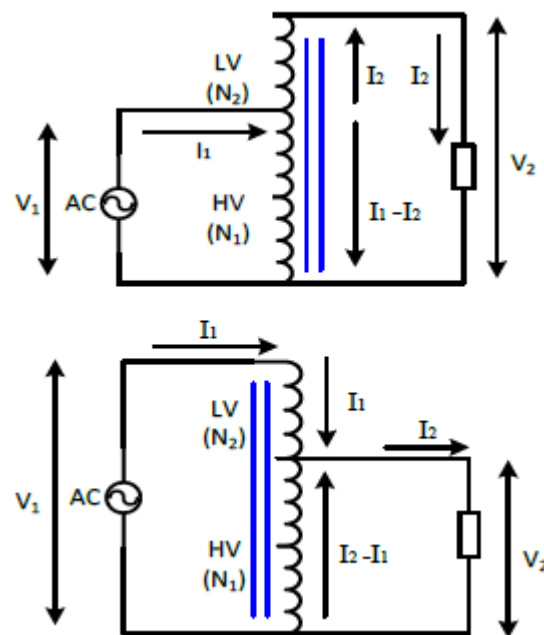


Abbildung 15: Spartransformator mit oben) Spannungserhöhung und unten) Spannungsreduktion bezüglich Primärspannung (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014)

Da beim Spartransformator die Primär- und Sekundärwicklung aus derselben Spule bestehen, erfolgt hier die Leistungsübertragung nicht allein über den magnetischen Weg, sondern (und vor allem) über den elektrischen Weg (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014). Somit lässt sich folgern, dass ein Spartransformator bei gleicher Leistungsübertragung bedeutend kleiner dimensionieren lässt. Es lassen sich viel Kupfer und Eisen sparen (darum Spartransformator).

Bei Spannungsverhältnissen bei denen die Ausgangs- und Eingangsspannung ( $U_2/U_1$ ) nahe bei Eins liegen und für Anwendungen bei denen keine galvanische Trennung notwendig ist, empfiehlt es sich, sich für einen Spartransformator zu entscheiden (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).

## 2.4.2 Bauarten

Die nachfolgend ausgeführten Transformatoren sind ausgelegt, eine Spannungskorrektur von  $\pm 10\%$  vorzunehmen. Folgende Hypothesen wurden angenommen:

- Ideale Schalter des OLTC
- Die Schalter arbeiten bezüglich der Spannung und dem Strom bidirektional.
- Die Spannungs- und Stromwerte sind die Nominalwerte und werden mit 1pu bezeichnet.
- Sämtliche Schaltstufen kompensieren 2% der Nominalspannung. Es werden somit  $N = 10$  Schaltstufen benötigt. ( $\pm 10\% \cong 20\%$ ;  $N \cdot 2\% = 20\%$ )
- Die Schemata sind in einphasiger Ausführung gezeichnet.

### 2.4.2.1 Bauart 1

Die Transformatoren der Bauart 1 bestehen aus einem konventionellen Transformator mit zwei Windungen, wobei die Primärwicklung (1.b) oder die Sekundärwicklung (1.a) mehr Windungen aufweist und die Ausgangsspannung auf 1.1pu anheben kann. Die galvanische Trennung ist gewährleistet. Wird die Ausgangsspannung auf und ab geregelt, wird ein Schalter für den Ausgangszustand ( $U_1 = U_2$ ) benötigt und für jeden Schritt der Spannungserhöhung zwei weitere Schalter (Anzahl Schalter =  $2 \cdot N + 1$ ).

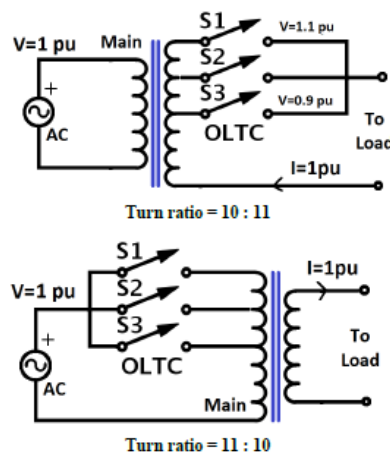


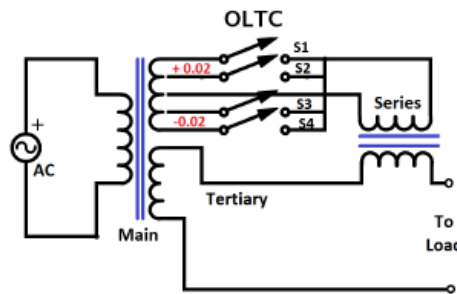
Abbildung 16: Bauart 1.a) oben und 1.b) unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014)

Da in unserem Fall die Ein- und Ausgangsspannung ca. die gleiche Spannung aufweisen und auch die Leistung dieselbe ist (sieht man von den Verlusten des Transformators ab), werden die Schalter auf beiden Seiten ca. gleich belastet. Findet bei der Bauart 1.a) eine Kurzschluss lastseitig statt, werden die Schalter mit dem Kurzschlussstrom belastet. Da in unserem Fall auch Primärseitig eine Leitung gleichen Charakters wie Sekundärseitig vorhanden ist, werden auch hier die Schalter im Kurzschlussfall mit dem Kurzschlussstrom belastet.

Wenn alle Schalter offen sind, werden sie mit einer Spannung von 0.9Vpu bis 1.1Vpu je nach Position belastet, ist ein Schalter geschlossen (Normalfall) werden die anderen entsprechend ihrer Position bis 0.2Vpu belastet. Kann man durch eine Schutzeinrichtung gewährleisten dass immer mind. ein Schalter geschlossen ist, kann die max. Spannung über den Schaltern auf 0.2Vpu begrenzt werden.

### 2.4.2.2 Bauart 2

Der Transformator der Bauart 2 bedient sich eines Transformators mit einem egalitären Übersetzungsverhältnis. Der Transformator weist jedoch noch eine dritte Windung auf, die Sekundärseitig angebracht ist. An ihr kann, ähnlich der Bauart 1, mit entsprechender Schaltung der Schalter eine variable Spannung abgegriffen werden, die durch einen Serietransformator mit Übersetzungsverhältnis 1:1 auf die Ausgangsspannung hinzuaddiert wird.



Turn ratio = 10:10:2 (Main) & 1:1 (Series)

Abbildung 17: Bauart 2 (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014)

Mithilfe dieser Bauform kann sichergestellt werden, dass sowohl die Primär- und die Sekundärseite, wie auch die Schalter voneinander galvanisch getrennt sind. Der Einsatz von zwei Transformatoren bedeutet einen entsprechenden Kostenzuwachs. Die Schalter müssen eine Gegenspannung von 0.1Vpu bis 0.2Vpu und 1pu des Laststromes aushalten können (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).

### 2.4.2.3 Bauart 3

Die Bauart 3 besteht aus einem Spartransformator mit Schaltern sekundärseitig. Bauart 3a) verfügt im Gegensatz zu Bauart 3b) über einen Schalter S der die Sekundärseite am oberen oder unteren Ende abgreifen kann. Mit diesem Schalter kann die Sekundärspannung vergrößert oder verkleinert werden. Bei Bauart 3b) geschieht dies mithilfe einer vergrößerten Anzahl von Schaltern, die den Spartransformator in eine *boost*- oder *buck*-Schaltung verwandeln. Siehe nächste Abbildung.

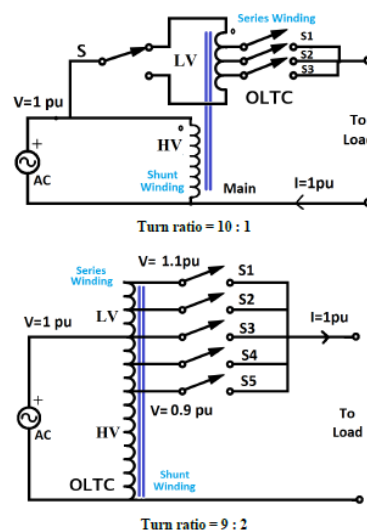


Abbildung 18: Bauart 3a) oben und Bauart 3b) unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014)

Die offenen Schalter der Schaltung 3a) müssen bis 0.1Vpu, die der Schaltung 3b) bis 0.2Vpu aushalten können wenn einer der Schalter geschlossen ist. Der Schalter  $S$  aus 3a) muss zwischen den anwählbaren Kontakten 0.1Vpu aushalten können. Sämtliche Schalter beider Schaltungsarten müssen für einen Strom von 1pu dimensioniert sein, wenn sie gegen Kurzschlussströme geschützt sind.

Diese Struktur ist einfach aufgebaut, reduziert den Materialverbrauch ist jedoch nicht galvanisch getrennt.

#### 2.4.2.4 Bauart 4

Um zu verhindern dass die Schalter direkt die Lastschalten müssen wie bei Bauart 3, beinhaltet Bauart 4 einen Serientransformator um eine Zusatzspannung auf die Leitung zu überlagern.

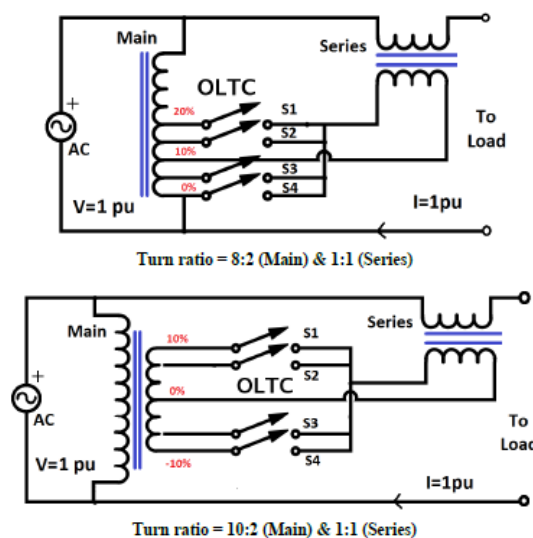


Abbildung 19: Bauart 4a) mit Spartransformator oben und Bauart 4b) mit konventionellem Transformator unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).

Bei Bauart 4a) befindet sich am Spartransformator ein Abgriff bei 10% der Nominalspannung der als Nullpunkt für den Serientransformator dient. Entsprechend kann über die zusätzlichen Schalter die Spannung über dem Serientransformator um 10% nach oben oder unten geregelt werden. Die Anzahl Schalter beläuft sich auf: Anzahl Schalter =  $2 \cdot N + 1$ . Die galvanische Trennung zwischen den Schaltern und der Übertragungsleitung ist nicht gewährleistet.

Die Bauart 4b) arbeitet nach demselben Prinzip wie 4a), jedoch sind die Schalter über einen konventionellen Transformator von der Übertragungsleitung getrennt.

Dadurch, dass bei beiden Ausführungen die Übertragungsleitung durchgehend ist, dienen die Transformatoren nur der Bereitstellung der Zusatzspannung, die Übertragene Leistung durch die Transformatoren beschränkt sich auf 0.1pu. Somit müssen sie auch nur für diese ausgelegt werden, dies erlaubt eine entsprechende kleinere Dimensionierung als bei den anderen Ausführungsformen.

Sind alle Schalter offen und steht die Übertragungsleitung unter Last, arbeitet der Serientransformator rückwärts. Dies führt zu einer Belastung der Schalter von bis zu 1.1Vpu. Will man diesen Effekt verhindern, gibt es die Möglichkeit den Serientransformator zu überbrücken.



### 2.4.2.5 Bauart 5

Grundsätzlich arbeitet die Bauart 5 gleich wie die Bauart 4. Zusätzlich kommt hier ein zusätzlicher Schalter zum Einsatz, der der Umkehrung der Richtung der Zusatzspannung dient. Damit lassen sich Schalter einsparen (Vergleiche Bauart 3).

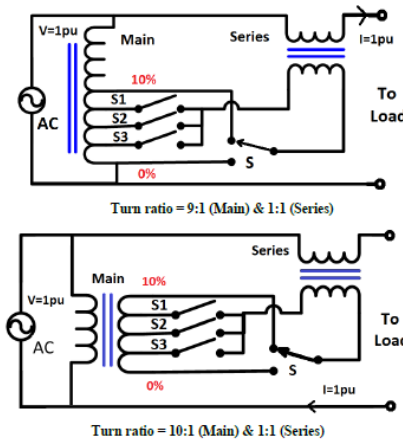


Abbildung 20: Bauart 5a) mit Spartransformator oben, und Bauart 5b) mit konventionellem Transformator unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).

Bauart 5a) und 5b) unterscheiden sich einzig durch den Einsatz eines Spartransformators bzw. eines konventionellen Transformators. Die Schalter müssen 0.1Vpu und für den Strom 1pu ausstehen können. Der Wahlschalter S muss für 0.1Vpu und 1pu für den Strom dimensioniert sein. Gegen Kurzschlussströme sind sie durch den Einsatz des Serietransformators geschützt.

### 2.4.2.6 Bauart 6

Der Transformator dieser Baureihe ist nur für die Leistung dimensioniert, die es braucht um die Spannung zu regeln, also 0.1pu der Leistung. Das Übersetzungsverhältnis des Haupttransformators liegt bei 100:1. Ist so geschaltet, dass 10% der Spannung überlagert werden soll, muss das Verhältnis 10:1 sein, bei 2% 50:1. Da die Windungen aber doppelt ausgeführt werden müssen um auch eine negative Spannung abdecken zu können, folgt das Windungsverhältnis von 100:1.

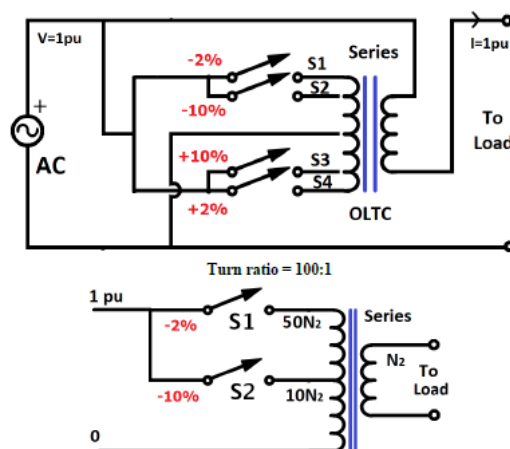


Abbildung 21: Bauart 6) (oben) mit positivem Windungsteil (unten) (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).

Die Schalter müssen für eine Blockierungsspannung von  $6V_{pu}$  bis  $-4V_{pu}$  ausgelegt sein. Dies kommt folgendermassen zustande: ist  $S_2$  geschlossen und  $S_1$  offen, steht über  $S_1$  die Spannung der Leitung von  $1V_{pu}$  und vom Transformator die Spannung  $5V_{pu}$  an. ( $1V_{pu} - 5V_{pu} = -4V_{pu}$ ). Über  $S_4$  steht die Spannung der Leitung von  $1V_{pu}$  und vom Transformator die Spannung  $-5V_{pu}$  an. ( $1V_{pu} - (-5V_{pu}) = 6V_{pu}$ ).

Sind alle Schalter ausgeschaltet, wird die Arbeitsrichtung des Serietransformators umgedreht und die Spannung eingangsseitig steigt aufgrund des stark ungleichen Übersetzungsverhältnisses  $100:1$  auf  $51V_{pu}$  bzw.  $-49V_{pu}$  an. Um diesem Effekt entgegen zu treten wird Bauart 7 verwendet.

### 2.4.2.7 Bauart 7

Damit bei einem allfälligen Offenstehen sämtlicher Schalter die Spannung eingangsseitig nicht so stark ansteigt, wurde bei dieser Struktur darauf geachtet die Schalter von der Primär- auf die Sekundärseite zu verlegen und auf der Primärseite einen Wahlschalter  $S$  für die Vorzeichenänderung der Zusatzspannung zu installieren. Siehe folgende Abbildung.

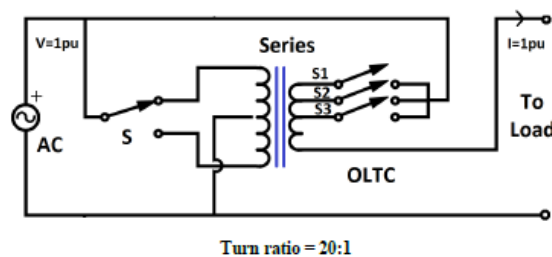


Abbildung 22: Bauart 7 mit einem konventionellen Transformator und den Schaltern Sekundärseitig (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).

Zum Nachteil hat diese Schaltung, dass die Schalter direkt dem Laststrom, und im Fehlerfalle dem Kurzschlussstrom ausgesetzt sind. Der Schalter  $S$  muss  $\pm 2V_{pu}$ , die anderen Schalter  $0.1V_{pu}$  aushalten können.

Die Primärwicklung ist für  $2V_{pu}$ , die Sekundärwicklung für  $0.1V_{pu}$  ausgelegt.

### 2.4.3 Auswahl geeigneter Bauarten

Die oben beschriebenen Bauarten wurden bezüglich ihrer Spannungs- und Stromnennwerte, sowie der Belastung der die Schalter ausgesetzt sind, analysiert. Sämtliche elf verschiedenen Bauarten sind für positive und negative Spannungskompensation ausgelegt.

Für Spannungsregelungen bei denen eine galvanische Trennung notwendig ist, sind die Bauarten 1a), 1b) und 2) die die bevorzugt werden, da sie als einzige Systeme die galvanische Trennung respektieren.

Ist keine galvanische Trennung erforderlich, bietet der Einsatz eines Spartransformators Materialersparnisse bei grösserem Leistungsvermögen. Die Bauarten 3, 4 und 5 bieten diesen Vorteil.

Die Bauarten 3a), 5a), 5b) und 7 kommen mit weniger Schaltern aus  $(N+1)$ , als die restlichen Bauarten 3b), 4a), 4b) und 6, die  $(2N+1)$  Schalter benötigen.

Um mit weniger Schaltern auszukommen, gibt es auch Nachteile: es wird ein zusätzlicher Schalter  $S$  gebraucht und der Strom muss im konstantem Zustand des Transformators zwei Schalter passieren (den Wahlschalter  $S$  und den Stufenschalter).

Unter Beachtung dieser Aspekte ist die Bauart 5 die geeignetste: reduzierte Anzahl Schalter und grössere Effizienz ohne galvanische Trennung.

Um die genaue Schaltungsart zu definieren, dienen folgende Tabellen in denen die Spannungs- Strom- und Leistungsnennwerte aller Bauarten zusammengefasst sind, zur Übersicht.

Topo-logy	Rating of main transformer (p.u.)					Rating of series transformer (p.u.)				
	$V$		$I$		$S$	$V$		$I$		$S$
	$1''$	$2''$	$1''$	$2''$		$1''$	$2''$	$1''$	$2''$	
1a	1	1.1	1.1	1	1.1	-	-	-	-	-
1b	1.22	1.1	1.1	1	1.1	-	-	-	-	-
2	1	0.2	1.1	1	1.1	0.1	0.1	1	1	0.1
3a	1	0.1	0.1	1	0.1	-	-	-	-	-
3a	0.9	0.2	0.1	1	0.1	-	-	-	-	-
4a	0.8	0.2	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	1	1	0.1
4b	1	0.2	0.1	1	0.1	0.1	0.1	1	1	0.1
5a	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	1	1	0.1
5b	1	0.1	0.1	1	0.1	0.1	0.1	1	1	0.1
6	-	-	-	-	-	10	0.1	(0.1, 0.02)	1	0.1
7	-	-	-	-	-	2	0.1	0.1	1	0.1

Tabelle 1: Überblick der Spannungs-, Strom- und Leistungsnennwerte (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014)

Topo-logy	No. of switches	Tap switch rating (p.u.)				Selector switch rating (p.u.)	
		$I$	$V_t$ (One tap close)		$V_t$ (All taps open)	$I$	$V_t$
			Forward	Reverse			
1a	10+1	1	(0.2, 0)	(0, 0.2)	(1.1, 0.9)	-	-
1b	10+1	1	(0, 0.2)	(0.2, 0)	1	-	-
2	10+1	1	(0.2, 0)	(0, 0.2)	(1.1, 0.9)	-	-
3a	(5+1)+1	1	(0.1, 0)	(0, 0.1)	(1.1, 1)	1	-0.1, 0.1
3b	10+1	1	(0.2, 0)	(0, 0.2)	(1.1, 0.9)	-	-
4a,4b	10+1	1	(0.2, 0)	(0, 0.2)	(-0.9, -1.1)	-	-
5a,5b	(5+1)+1	1	(0.1, 0)	(0, 0.1)	(-1.1,-1)	1	-0.1, 0.1
6	10+1	(0.02, 0.1)	Upto 6	Upto 4	(-49, 51)	-	-
7	(5+1)+1	1	(0.1, 0.04)	(0.1, 0.04)	(-0.9, -1)	0.1	-2, 2

Tabelle 2: Überblick Anzahl Schalter (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014)

Vergleicht man die zwei Varianten der Bauart 5, so ist zu sehen, dass beide Ausführungen die gleiche Anzahl an Schaltern benötigen. 5a) muss eine um 0.1Vpu höhere Spannung aushalten können wenn alle Schalter offen sind. Ansonsten müssen sie abgesehen von der Richtung der Spannung für die gleichen Werte dimensioniert sein (Tabelle 2).

Betrachtet man die Tabelle 1, stellt man fest, dass in Bauart 5a) der Haupttransformator um 0.1Vpu und der Serietransformator um 0.1pu des Stroms kleiner als Bauart 5b) dimensioniert sind. Dies, da die Bauart aus einem Spartransformator gebaut ist.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass ein Transformator der Bauart 5a) für einen Einsatz in der Übertragungsleitung Viez-90 am geeignetsten ist.

Aufgrund fehlender Quellen, stellt der Autor dieses Berichts folgende Hypothese auf: Aufgrund dessen, dass die zwei-Windungs-Transformatoren viel häufiger produziert werden, können sie trotz des grösseren Materialverbrauchs billiger in der Produktion sein.

## 2.5 Auswahl der geeigneten Systeme

Aus den oben genannten Systemen fallen für die Problemstellung dieser Arbeit viele weg, da sie aus unterschiedlichen Gründen nicht geeignet sind. Sei es, dass sie hauptsächlich auf der Hochspannungsebene angewandt werden, nicht primär der Spannungsregelung dienen oder zu komplexe Lösungen darstellen. Es können auch verschiedene Gründe zutreffend sein. Folgende Tabelle dient als Zusammenfassung der verschiedenen Möglichkeiten.

Lösung	Spannung	Leistung	Phasen- verschiebung	Vermaschtes Netz	Nichtvermaschtes Netz	Kosten [CHF]
SVC	52<kV<765	50<MVar<1000	Ja		Ja	>1 Mio.
STATCOM	52<kV<765	50<MVar<500	Ja		Ja	>1 Mio.
TCSC	kV<550	MVar<500	Ja	Ja		>1 Mio.
PAR	HS / MS	MVar<2500	Ja	Ja		>1 Mio.
SSSC	HS		Ja / Nein	Ja		<1 Mio.
UPFC	HS / MS		Ja / Nein	Ja		>1 Mio.
LVR (Bauart5a)	NS / MS	kVA<1000	Nein		Ja	<1 Mio.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Eigenschaften der verschiedenen Lösungen

Es ist zu sehen, dass der LVR die Anforderungen am besten erfüllt, wobei sich aus den untersuchten Bauarten der Längsspannungsregler derjenige der Bauart 5a) am besten eignet. Er kann auf der Mittelspannungsebene eingesetzt werden, hat keinen Einfluss auf die Phasenverschiebung und ist geeignet für ein nicht vermaschtes Netz. Die Kosten eines LVR sind niedriger (SSSC ähnlich) als bei den anderen Möglichkeiten und belaufen sich unter 1 Mio. CHF (Romand-Energie). Die induzierte Leistung ist mit bis zu 1000 kVA geringer als bei den anderen Systemen.

In einem nächsten Schritt wird der LVR Bauart 5a) in die Modellierung des Verteilnetzes eingesetzt und mit den entsprechenden Szenarien getestet.

### 3 Modellierung und Simulationen

#### 3.1 Modellierung des Netzes

Mithilfe der Angaben der Firma Romande Energie (Anhängen 1-2) wurde ein vereinfachtes Netzmodell mit dem Programm PowerFactory der Firma DgSILENT gezeichnet. Das Netz entspricht dem heutigen, die Lasten entsprechen jedoch denjenigen der Zukunft.

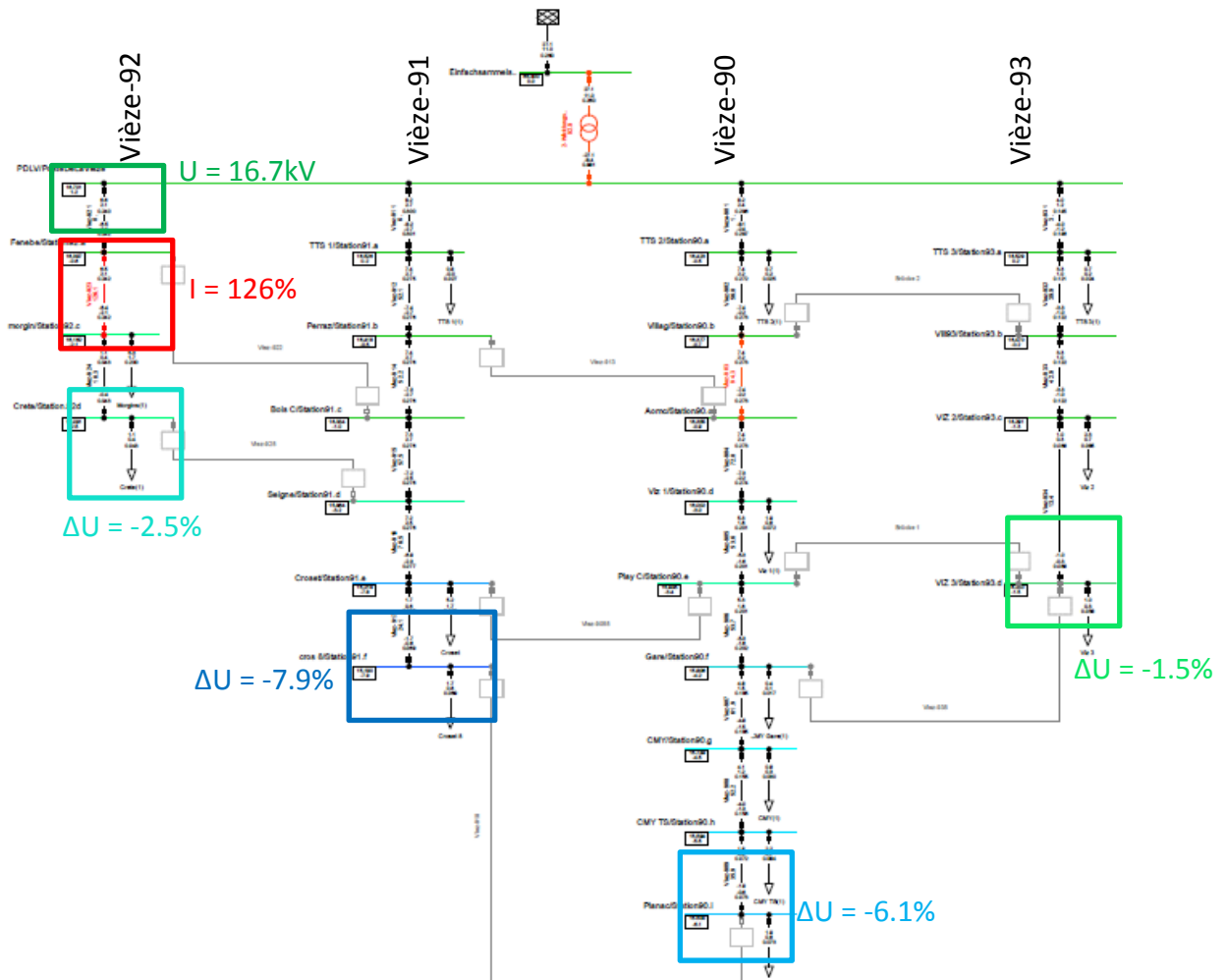


Abbildung 23: Modellbildung des vereinfachten Verteilnetzes

Die Simulation (siehe vorangegangene Abbildung) zeigt, dass die Abgangsspannung der Poste-de-la-vièze bei ca. 16.7 kV liegt. Die entspricht ziemlich genau der von der Firma Romande Energie, während den kritischen Zeitpunkten, gemessenen Spannung.

## 3.2 Netzanpassung

### Normalbetrieb

Mit dem Resultat der ersten Simulation zeigt sich, dass das Verteilnetz zu schwach für die zukünftigen Lasten ausgelegt ist. So ist die Leitung Viez-923 zu 126% ausgelastet (siehe Abbildung 23, Anhang 3). Dies liegt deutlich über der Marke von 110%, bei der die Firma Romande Energie eine Auswechslung des Kabels vornimmt. Somit muss die Leitung ersetzt werden. Wird sie mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al ersetzt (Daten von Romande Energie, Anhang 2), kann die Auslastung der Leitung entsprechend reduziert werden.

Auf zwei Strängen (Vièze-90, Vièze-91) sinkt die Spannung entlang der Leitung unter den Grenzwert von -4%, hier muss etwas unternommen werden. Auf den anderen zwei Strängen werden die Spannungslimiten eingehalten (Anhang 4).

### Notbetrieb

Mit der Analyse verschiedener Not-Szenarien zeigte sich, dass auf einzelnen Leitungsabschnitten eine Überbelastung der Leiter von über 110% auftritt (Anhang 5, 6).

In der Folge wurden die Abschnitte Viez-931, Viez-903 und Viez-916 mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al ersetzt um diesen Überbelastungen entgegenzutreten. Somit können sämtliche Grenzwerte (Spannungsgrenzwerte und thermische Grenzwerte) im Notbetrieb eingehalten werden, ausser bei nachfolgenden beiden Fällen bei denen das (N-1)-Prinzip nicht gewährleistet ist.

- Bei einer Abschaltung des Leitungsabschnittes Viez-916 kann die Station LES CROSETS nicht mehr gespeist werden, wenn die Kabel nicht überlastet werden sollen (Anhänge 7, 8). Eine Verstärkung der Kabel des Leitungsabschnittes Vièze-90 führt hier nicht zum Ziel, da das neue Kabel nicht für einen grösseren Strom ausgelegt ist, als die bereits bestehenden (Bsp.: Viez-911).
- Bei einem Fehlerfalle bei Viez-907, können sämtliche Stationen zwar versorgt werden ohne dass die Kabel überlastet werden, jedoch können ohne zusätzliche Massnahmen die Spannungsgrenzwerte nicht eingehalten werden (Anhang 9).

Durch den Austausch der zitierten Leitungsabschnitte konnten die Spannungsabfälle an den Enden der Leitungen reduziert werden (Vièze-90: -6%, Vièze-91: -5.5%, Vièze-92: -1.6%, Vièze-93: -1%). (Siehe Anhang 10).

Ausgehend von diesem Modell folgen die Spannungskorrekturen der Leitungen Vièze-90 und Vièze-91.

## 4 Spannungskorrektur

Das Konzept des Netzunterhalts basiert auf dem NOVA-Prinzip (H, et al., 2014):

Das NOVA-Prinzip wird wie folgt definiert:

- Netzoptimierung ist grundsätzlich einer Netzverstärkung vorzuziehen
- Netzverstärkung hat Priorität vor dem Netzausbau

Bei der Ausarbeitung der nachfolgenden Lösungsansätze wurde auf eine Befolgung des NOVA-Prinzips geachtet. In der Folge ist auch der Bericht in dieser Weise strukturiert. Zuerst wird die Spannungskorrektur auf der Linie Vièze-90 und später in der gleichen Art und Weise die der Linie Vièze-91. In einem dritten Schritt wird den Lösungsansätzen die linienübergreifend arbeiten Beachtung geschenkt. Sämtliche Lösungsansätze sind mit einem Buchstaben nummeriert. Dies vereinfacht anschliessend die Übersicht.

## 4.1 Spannungskorrektur Vièze-90

Es wird das NOVA-Prinzip angewendet.

### 4.1.1 Netzoptimierung

Von den im Mehrjahresplan der VSE (H, et al., 2014) aufgelisteten Möglichkeiten können die meisten nicht realisiert werden. Von den Möglichkeiten kommt nur die der Aufteilung der Lasten in Frage.

#### A) Teilspeisung via Vièze-91

Wird die letzte Station PLANACHAUX C der Vièze-91 gespeist, können die Spannungsgrenzen auf den von der Vièze-90 gespeisten Stationen eingehalten werden, wie in Abb. 24 dargestellt. Jedoch steigt der Spannungsabfall entlang der Vièze-91, insbesondere bei PLANACHAUX C liegt der Spannungsabfall mit -7.8% deutlich zu hoch. Die thermische Auslastung der am stärksten ausgelasteten Leitungsabschnitte steigt zudem von 56.2% auf 72.8% (Viez-916). Da die Spannung auf der Leitung Vièze-91 weiter sinkt, ist von dieser Option abzusehen (Anhang 11).

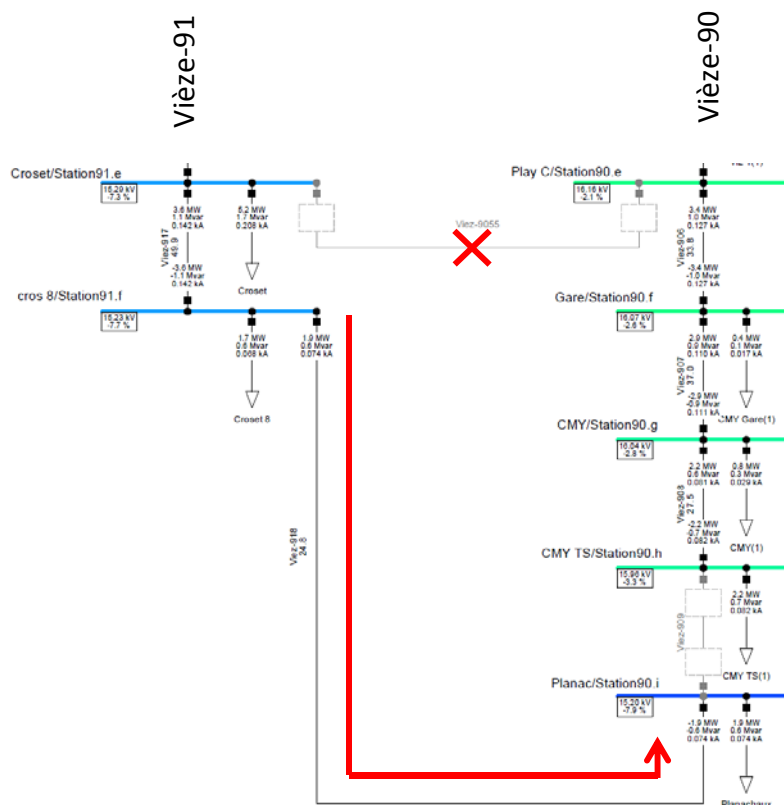


Abbildung 24: Speisung der Station PLANACHAUX C via Vièze-91 mit Lastfluss in rot



### B) Teilspeisung via Vièze-93

Werden die Stationen der Leitung Vièze-90 ab der Station CMY Gare via Vièze-93 gespeist, muss diese aufgrund der thermischen Auslastung ausgewechselt werden (Anhang 12). Wird dies gemacht, so liegt die Spannung am Ende der Leitung bei PLANACHAUX C bei -6.3% (Anhang 13). Da dies noch tiefer als die ursprüngliche Methode ist, ist dies keine wählbare Option.

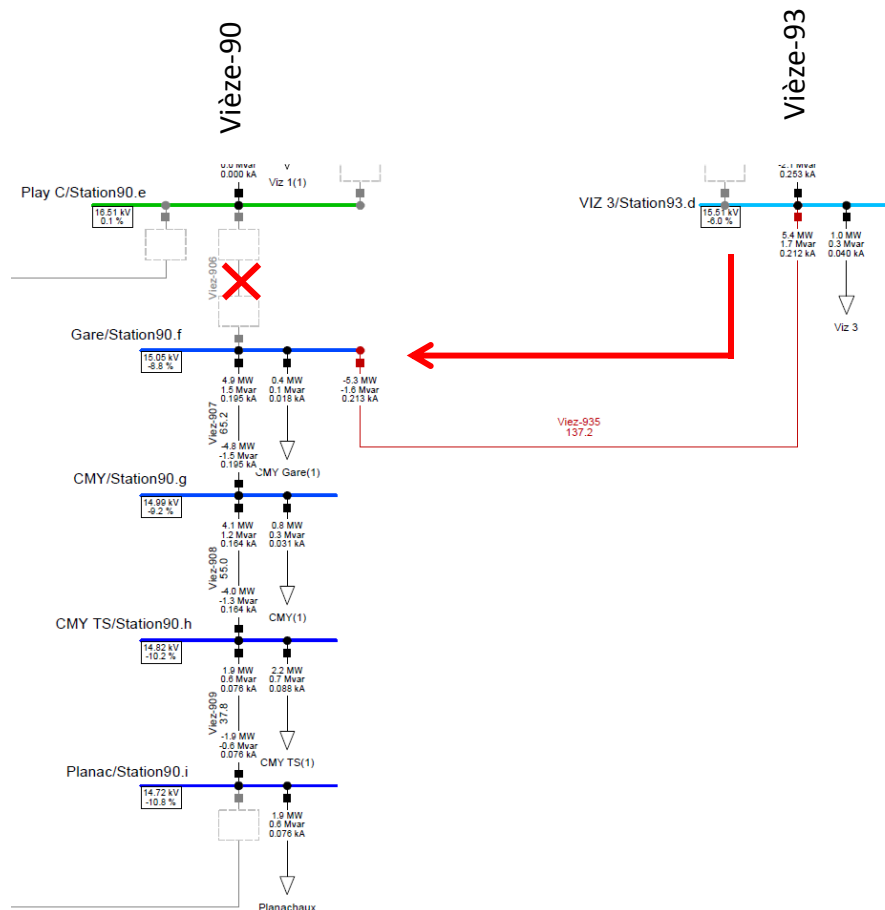


Abbildung 25: Teilspeisung der Linie Vièze-90 via Vièze-93 mit thermischer Überlastung der Vièze-935. Lastfluss in rot.

### C) Teilspeisung via Vièze-93 und Vièze-91

Wird zusätzlich zur Möglichkeit B die Station PLANACHAUX C von der Vièze-91 gespeist (immer mit Speisung von der verstärkten Leitung Vièze-93) kann die Station CMY TS die Spannungsgrenzen zwar einhalten, bei der Station PLANACHAUX C steigt der Spannungsabfall jedoch auf -7.9% (Anhang 14). Somit erlaubt es diese Variante nicht, die Spannungsgrenzen einzuhalten.

### 4.1.2 Netzverstärkung

Für eine Netzverstärkung gemäss NOVA-Prinzipien kommt für dieses Modell nur die Auswechslung der bestehenden Kabel in Frage.

#### D) Verstärkung auf der gesamten Leitung Vièze-90

Die gesamte Leitung wird mit dem Kabel vom Typ XD 400mm<sup>2</sup> Al ersetzt.

Der Spannungsabfall wird entlang der Leitung kleiner im Vergleich zu der nicht verstärkten Linie. Die Spannung bei PLANACHAUX C liegt mit -4.3% dennoch unterhalb des zulässigen Wertes (Anhang 15).

Trotz aufwendiger Sanierung auf der gesamten Leitungslänge, reicht diese Massnahme nicht aus um das zulässige Spannungsband zu gewährleisten.

### 4.1.3 Netzausbau

Der Netzausbau gemäss NOVA-Prinzipien beinhaltet Neubauten von Trasses und Schaltanlagen. Der Einsatz eines LVR kann auch als Ausbau des Netzes gesehen werden.

#### 4.1.3.1 Einsatz eines LVR

##### E) Einsatz eines LVR auf Vièze-90

Der LVR muss vor der Station CMY Gare positioniert werden, da diese Station bereits eine zu tiefe Spannung aufweist. Je früher der LVR in der Leitung platziert wird, desto grösser muss er dimensioniert sein (siehe nachfolgenden Abschnitt).

Um einen LVR einzusetzen, muss dieser zuerst dimensioniert werden.

#### Dimensionierung des LVR

Die Scheinleistung die der LVR (Transformator Bauart 5b) der Leitung hinzufügen muss, lässt sich folgendermassen berechnen:

$$S_{LVR} = \Delta U * I_{MAX}(t) * \sqrt{3}$$

Wobei:

- $\Delta U$  := zu eliminierender Spannungsabfall
- $I_{MAX}(t)$  := Maximaler Strom im Leiter
- $S_{LVR}$  := Scheinleistung des LVR

Die Spannung bei PLANACHAUX C liegt -6% unter dem Niveau der Nennspannung. Somit beträgt der zu eliminierende Spannungsabfall  $\Delta U = 6\%$  der Nennspannung

$$\Delta U = 6\% * U_N = 0.06 * 16.5kV = \mathbf{1006.5V}$$

$I_{MAX}(t)$  ist von dem Leitungsabschnitt abhängig auf dem er zum Einsatz kommt.

Auf den Leitungsabschnitten Vièz-901 bis Vièz-903 beträgt  $I_{MAX}(t) = 480$  A, auf den Abschnitten Vièz-904 bis Vièz-906 beträgt  $I_{MAX}(t) = 376$  A.

Somit muss der LVR für die Abschnitte Viez-901 bis Viez-903 wie folgt dimensioniert sein:

$$S_{LVR} = 1006.5V * 480A * \sqrt{3} = 836.8kVA$$

Für die Abschnitte Viez-904 bis Viez-906 reicht folgende Dimensionierung aus:

$$S_{LVR} = 1006.5V * 376A * \sqrt{3} = 655.5kVA$$

**Platzierung**

Bei einem Einsatz bei CMY GARE (Anhang 16) sinkt die Spannung am Eingang des LVR unter den Grenzwert, somit ist von einem Einsatz an diesem und den später in der Linie liegenden Orten abzusehen.

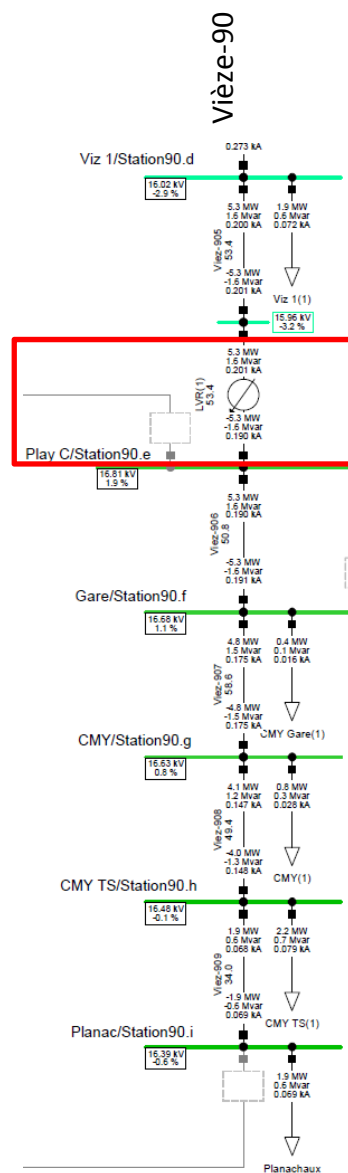


Abbildung 26: Einsatz LVR eingangs der Station VIZ 1

Zwischen den Orten VIZ 1 (Anhang 17) und PLAY C (Anhang 18) gibt es keine relevanten Unterschiede. Speziell zu beachten ist, dass im Fehlerfalle von Vieze-916 (Notbetrieb) die Grenzwerte der Spannung eingehalten werden können wenn der LVR bei VIZ 1 platziert ist (Anhang 19), nicht aber wenn der LVR bei PLAY C platziert ist (Anhang 20). Die thermischen Grenzwerte können in keinem der beiden Fälle respektiert werden, was zusätzliche Massnahmen erfordert (siehe Lösung O). Durch diese Massnahmen, können später auch die Spannungsgrenzwerte in beiden Fällen eingehalten werden.

## 4.2 Spannungskorrektur Vièze-91

Auch hier wird das NOVA-Prinzip angewendet.

### 4.2.1 Netzoptimierung

Von den im Mehrjahresplan der VSE (H, et al., 2014) aufgelisteten Möglichkeiten können die meisten nicht realisiert werden. Von den Möglichkeiten kommt nur die der Aufteilung der Lasten in Frage.

#### F) Teilspeisung via Vièze-92

Wird die Leitung Vièze-91 ab der Station SEIGNEUX C von der Leitung Vièze-92 gespeist, so werden die Kabel dieser Leitung so überbelastet, dass sie ausgewechselt werden müssten. Zudem sinkt die Spannung noch tiefer als im Ist-Zustand (Anhang 21, Abb. 27). Damit ist dies keine Möglichkeit die weiter verfolgt werden kann.

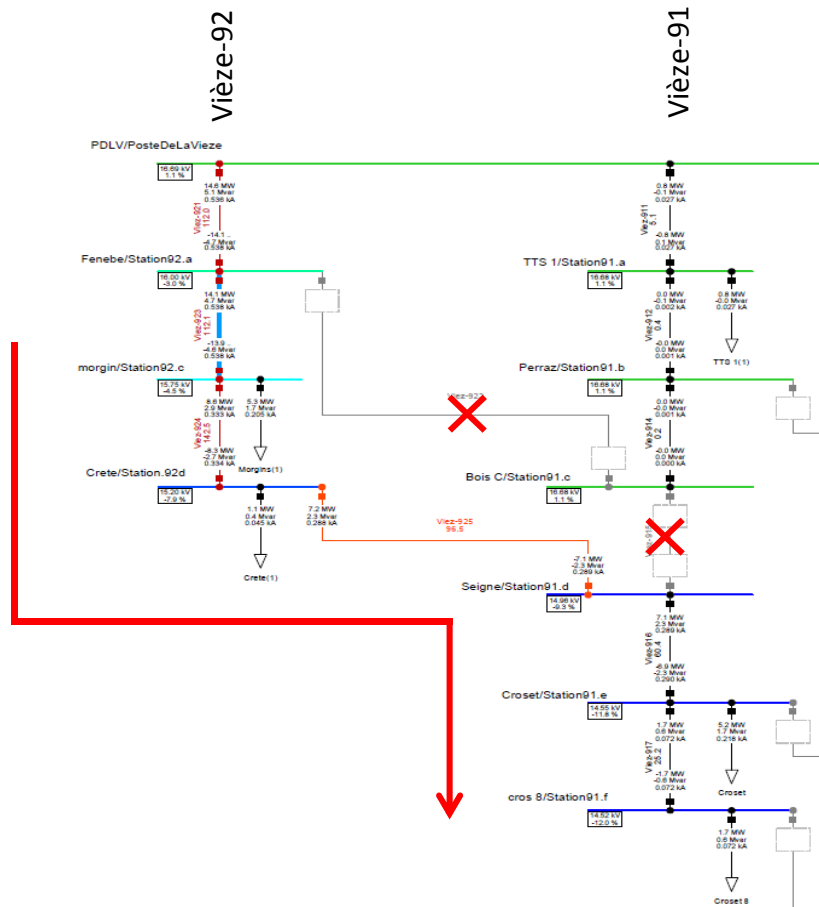


Abbildung 27: Teilspeisung der Vièze-91 via Vièze-92 mit Lastfluss in rot

**G) Teilspeisung via Vièze-92 und Vièze-90**

Wird zusätzlich die Station CROSET 8 von der Vièze-90 gespeist (Anhang 22), reicht das zwar aus um die thermische Überbelastung zu eliminieren, nicht jedoch um die Spannungsgrenzwerte einzuhalten. Der Spannungsabfall ist bei der Station CROSET 8 mit -9% grösser als im Ist-Zustand mit -5.5%.

Aus diesen Gründen ist diese Option nicht geeignet.

**4.2.2 Netzverstärkung**

Für eine Netzverstärkung gemäss NOVA-Prinzipien kommt für dieses Modell nur die Auswechslung der bestehenden Kabel in Frage.

**H) Verstärkung auf der gesamten Leitung Vièze-91**

Die gesamte Leitung wird mit dem Kabel vom Typ XD 400mm<sup>2</sup> Al ersetzt.

Der Spannungsabfall wird entlang der Leitung kleiner, im Vergleich zu der nicht verstärkten Linie. Die Spannung bei CROSET 8 liegt mit -4.4% dennoch unterhalb des zulässigen Wertes (Anhang 23).

Trotz aufwendiger Sanierung auf der gesamten Leitungslänge reicht diese Massnahme nicht aus, um das zulässige Spannungsband zu gewährleisten.

**4.2.3 Netzausbau**

Der Netzausbau gemäss NOVA-Prinzipien beinhaltet Neubauten von Trasses und Schaltanlagen. Der Einsatz eines LVR kann auch als Ausbau des Netzes gesehen werden.

**4.2.3.1 Einsatz eines LVR****I) Einsatz eines LVR auf Vièze-91**

Der LVR muss vor der Station CROSET 8 positioniert werden, da diese Station bereits eine zu tiefe Spannung aufweist. Je früher der LVR in der Leitung platziert wird, desto grösser muss er dimensioniert sein (siehe nachfolgenden Abschnitt).

Um einen LVR einzusetzen, muss dieser zuerst dimensioniert werden.

**Dimensionierung des LVR**

Die Scheinleistung die der LVR der Leitung hinzufügen muss, lässt sich gleich wie in Kapitel 4.1.3.1 beschrieben berechnen.

Die Spannung bei CROSET 8 liegt -5.5% unter dem Niveau der Nennspannung. Somit beträgt der zu eliminierende Spannungsabfall  $\Delta U = 5.5\%$  der Nennspannung

$$\Delta U = 5.5\% * U_N = 0.055 * 16.5kV = 907.5V$$

$I_{MAX}(t)$  ist von dem Leitungsabschnitt abhängig auf dem er zum Einsatz kommt. Auf den Leitungsabschnitten Viez-911, Viez-912 und Viez-914 beträgt  $I_{MAX}(t) = 529$  A, auf dem Abschnitt Viez-915 und auf dem Abschnitt Viez-916 beträgt  $I_{MAX}(t) = 480$  A.

Somit muss der LVR für die Abschnitte Viez-911, Viez-912 und Viez-914 wie folgt dimensioniert sein:

$$S_{LVR} = 907.5V * 529A * \sqrt{3} = 831.5kVA$$

Für die Abschnitte Viez-915 und Viez-916 reicht folgende Dimensionierung aus:

$$S_{LVR} = 907.5V * 480A * \sqrt{3} = 754.5kVA$$

### Platzierung

Simuliert man den Einsatz des LVR bei der Station LES CROSET (Anhang 24), sieht man, dass eingangs LVR die Spannung -5.3% unter den Grenzen liegt.

Wird der LVR bei BOIS C installiert (Anhang 25), liegt der Spannungsabfall am Ende der Leitung bei -2.5%. Wird er am Ausgang der Station SEIGNEUX C montiert (Anhang 26), sinkt der Spannungsabfall am Ende der Leitung auf -0.4%. Speziell zu beachten ist, dass im Fehlerfalle von Viez-907 (Notbetrieb) die Grenzwerte der Spannung eingehalten werden (Anhang 27). Bei einem Ausfall der Leitung Viez-916 können die Spannungsgrenzwerte jedoch nicht garantiert werden (Anhang 28).

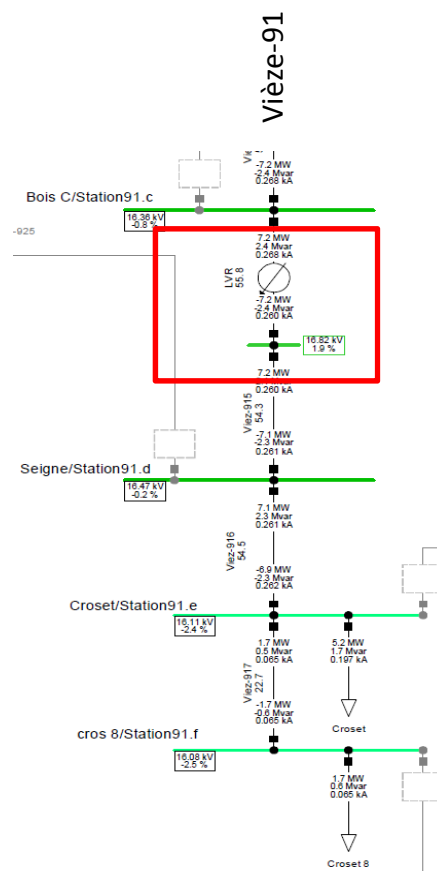


Abbildung 28: LVR bei BOIS C

Am vorteilhaftesten ist eine Installation des LVR bei den Stationen SEIGNEUX C und BOIS C, wobei die Entscheidung zwischen beiden mit weiteren Bedingungen, wie z.B. Baukosten, Zugänglichkeit etc. präzisiert werden könnte.

### 4.3 Kombinerende Spannungskorrekturen

Durch geeignete Massnahmen sollen die Eingriffe (und damit Kosten) auf beiden Linien auf ein Minimum reduziert werden, um die Spannungsgrenzwerte auf den Linien Vièze-90 und Vièze-91 gemeinsam zu garantieren.

#### 4.3.1 Netzoptimierung / -verstärkung

##### J) Speisung der Stationen LES CROSETS und PLAY C via Vièze-93

Als Netzoptimierung kommt praktisch nur eine Möglichkeit in Frage: die Stationen PLAY C und LES CROSETS werden via Vièze-93 gespeist (Anhang 31). Es ist zu sehen, dass die Leitungen der Linie Vièze-93 inkl. Viez-9055 deutlich überlastet werden (147% bis 457%). Sämtliche Leitungen müssten ausgewechselt werden (Netzverstärkung).

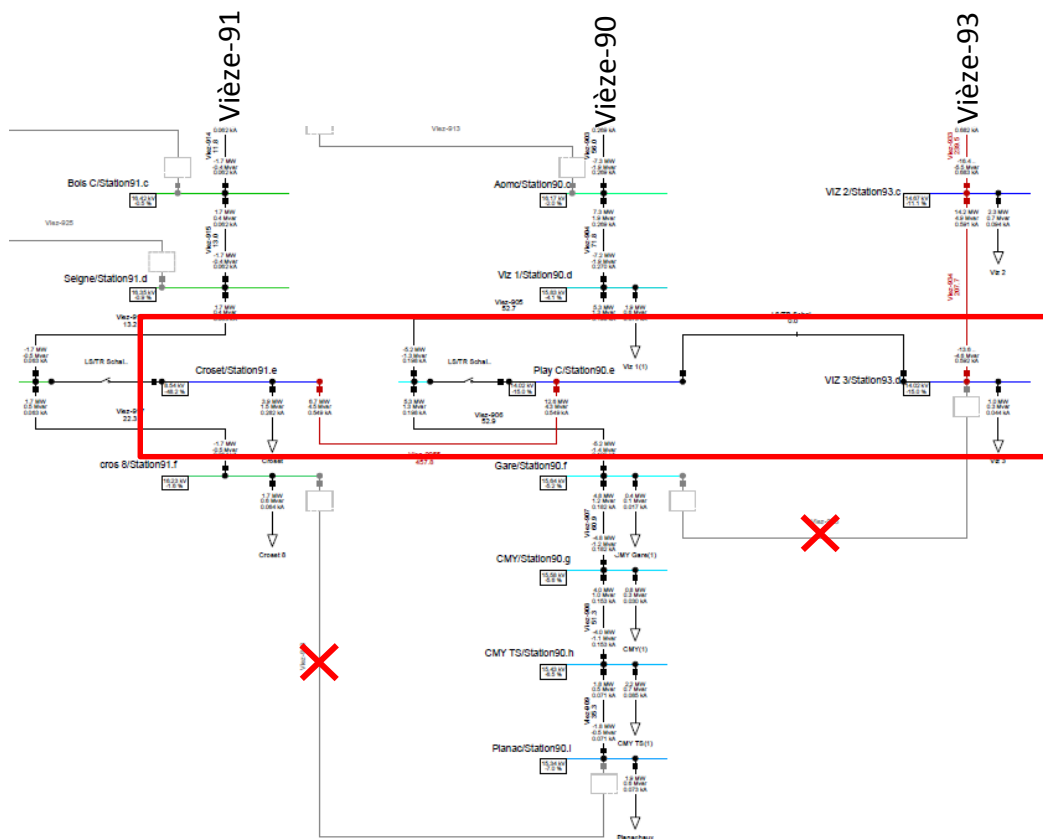


Abbildung 29: Speisung der Stationen LES CROSETS und PLAY C via Vièze-93

Werden die überlasteten Leitungen durch das Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al ausgewechselt, damit die thermischen Grenzwerte eingehalten werden, können auch die Spannungsgrenzen bei LES CROSETS eingehalten werden. Dennoch können auf der Linie Vièze-90 die Spannungsgrenzwerte nicht eingehalten werden (Anhang 30).

Im Falle eines Notbetriebs können sämtliche Stationen so gespeist werden, dass die Grenzwerte eingehalten werden können. Da die Spannung nicht bei allen Stationen genügend korrigiert werden kann, ist diese Möglichkeit nicht geeignet.

### 4.3.2 Netzausbau

#### K) Einsatz eines LVR auf der Linie Vièze-90 mit Umverteilung der Lasten

Die Idee ist, durch Umverteilung der Last CROSETS 8 und einem Einsatz eines LVR's auf einer Linie, die Spannungsgrenzwerte auf beiden kritischen Linien (Vièze-90 und Vièze-91) einhalten zu können und zugleich Ressourcen einzusparen.

Wird der LVR entlang der Leitung Vièze-90 eingesetzt, erlaubt dies die Einhaltung der Spannungsgrenzen auf der Linie. Bei einer allfälligen Umverteilung der Lasten an den Enden der Leitungen, bzw. CROSET 8 wird auch von Vièze-90 gespeist, können die Spannungsgrenzwerte trotz entsprechender Platzierung und Dimensionierung nicht eingehalten werden (Anhang 31 und 32). Eine Auswechslung des Abschnitts Vièze-904 mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al ist dafür nötig und wird vorgenommen.

Mit einer anschliessenden Simulation (Anhang 33) kann gezeigt werden, dass die Spannungsgrenzwerte eingehalten werden können, wenn das Kabel ersetzt und ein LVR bei der Station VIZ 1 installiert wurde.

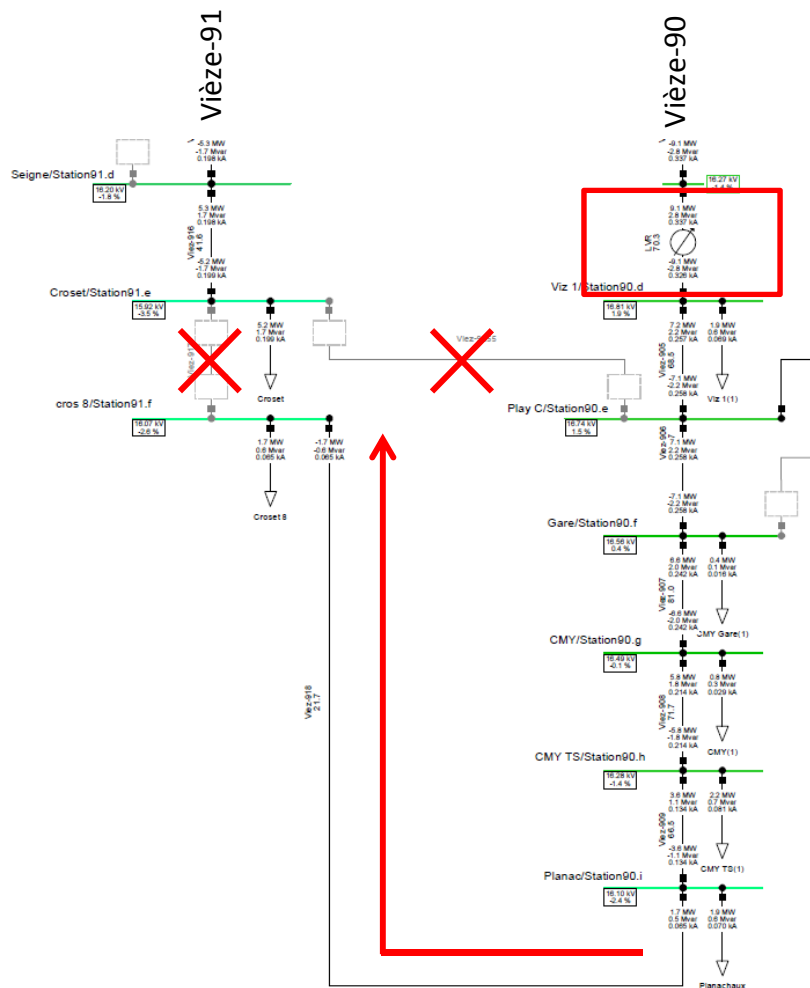


Abbildung 30: LVR bei VIZ 1 und CROSETS 8 wird von der Vièze-90 gespeist. Lastfluss in rot.



Die Dimensionierung des LVR's wurde mit den Werten der entsprechenden Simulation (Anhang 34) durchgeführt. Der Maximalstrom beträgt  $I_{MAX}(t) = 480 \text{ A}$ .

$$\Delta U = 8\% * U_N = 0.08 * 16.5kV = 1320V$$

$$S_{LVR} = 1320V * 480A * \sqrt{3} = 1097kVA$$

Das Problem dieser Möglichkeit ist bei einem Fehlerfall auf dem Leitungsabschnitt Vièze-907. Der Spannungsabfall an den Stationen LES CROSET bis CMY GARE steigt auf über -9% (Anhang 35). Da dies zu hoch ist, muss eine Lösung gefunden werden, um den Notbetrieb in jedem Fall aufrecht zu erhalten. Dies kann durch einen Einsatz eines zweiten LVR (Kombination der Lösungen E / I) oder durch einen Neubau einer neuen Leitung sein.

**L) Einsatz eines LVR auf der Linie Vièze-91 mit Umverteilung der Lasten**

Die Idee ist, durch Umverteilung der Last PLANACHAUX C und einem Einsatz eines LVR's auf einer Linie, die Spannungsgrenzwerte auf beiden kritischen Linien (Vièze-90 und Vièze-91) einhalten zu können und zugleich Ressourcen einzusparen.

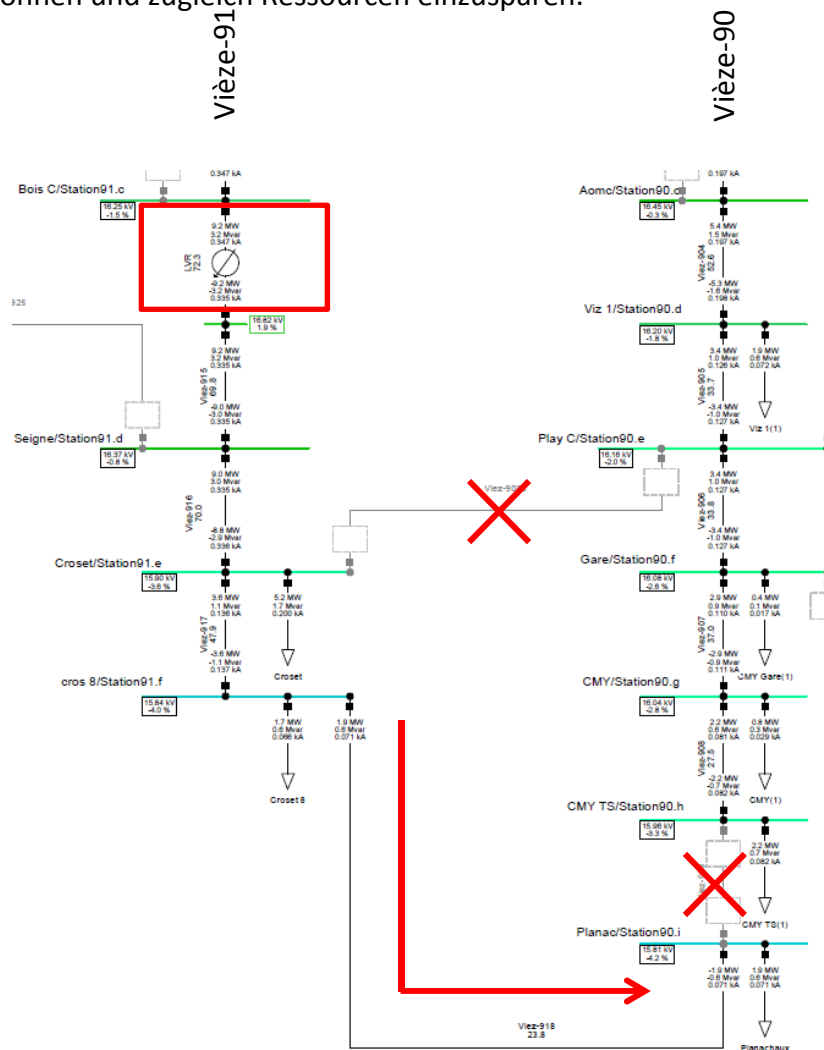


Abbildung 31: LVR bei BOIS C und PLANACHAUX C wird von der Vièze-91 gespeist. Lastfluss in rot.

Wird ein LVR entlang der Leitung Vièze-91 eingesetzt, und PLANACHAUX C von Vièze-91 gespeist, erlaubt dies trotz entsprechender Platzierung (bei Station SEIGNEUX C oder BOIS C wäre der LVR am geeignetsten einzusetzen) und Dimensionierung des LVR's nicht die Einhaltung der Spannungsgrenzen auf der gesamten Linie Vièze-91 (Anhänge 36, 37). Die Spannungsgrenzwerte der Linie Vièze-90 hingegen werden im Normalbetrieb respektiert. Es ist zu beachten, dass die Dimensionierung des LVR's mit den Werten der entsprechenden Simulation (Anhang 38) durchgeführt wird. Der Maximalstrom beträgt auf den betreffenden Abschnitten  $I_{MAX}(t) = 480 \text{ A}$ .

$$\Delta U = 7.9\% * U_N = 0.079 * 16.5kV = \mathbf{1305V}$$

$$S_{LVR} = 1305V * 480A * \sqrt{3} = \mathbf{1085kVA}$$

Aufgrund der Nichteinhaltung der Spannungsgrenzwerte, kann diese Variante nicht als Option betrachtet werden.

#### M) Einsatz eines LVR auf Vièze-91 mit Umverteilung der Lasten und Verstärkung von Viez-915

Variante L) wird ergänzt, indem der Leitungsabschnitt Viez-915 ausgewechselt wird. In Anhang 36 ist zu sehen, dass der Spannungsabfall über dem Leitungsabschnitt Viez-915 2.7% beträgt. Dieser relativ grosse Spannungsabfall könnte mit einem Austausch der Kabel und Freileitungen des Leitungsabschnittes Viez-915 vermindert werden. Wird dieser Abschnitt mit einem Kabel des Typs XD 400mm<sup>2</sup> Al ausgewechselt, kann hier der Spannungsabfall im Normalbetrieb auf 1.1% reduziert werden. Dazu kann der LVR bei BOIS C (Anhang 39) oder SEIGNEUX C (Anhang 40) installiert werden. Beim Ausfall des Leitungsabschnittes Viez-907 kann der Notbetrieb gewährleistet werden, nicht aber beim Ausfall des Leitungsabschnittes Viez-916 (Anhang 7). Somit reduziert sich der Spannungsabfall auf -5.8% der Nennspannung. Der Maximalstrom beträgt auf besagten Leitungsabschnitten  $I_{MAX}(t) = 480 \text{ A}$ . Somit sind die Dimensionen folgendermassen:

$$\Delta U = 5.8\% * U_N = 0.058 * 16.5kV = \mathbf{957V}$$

$$S_{LVR} = 957V * 480A * \sqrt{3} = \mathbf{795kVA}$$

#### N) Neubau Leitung Poste-de la-Vièze nach CROSETS 8

Wird eine neue Leitung mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al nach CROSETS 8 und von dort die Stationen CROSETS 8 und PLANACHAUX C gespeist, können die Spannungs- und thermischen Grenzwerte sowohl im Normal- wie auch im Notbetrieb respektiert werden ohne weitere Massnahmen (Anhang 41). Insbesondere auch bei einem Ausfall des Abschnitts Viez-916 (Anhang 42).

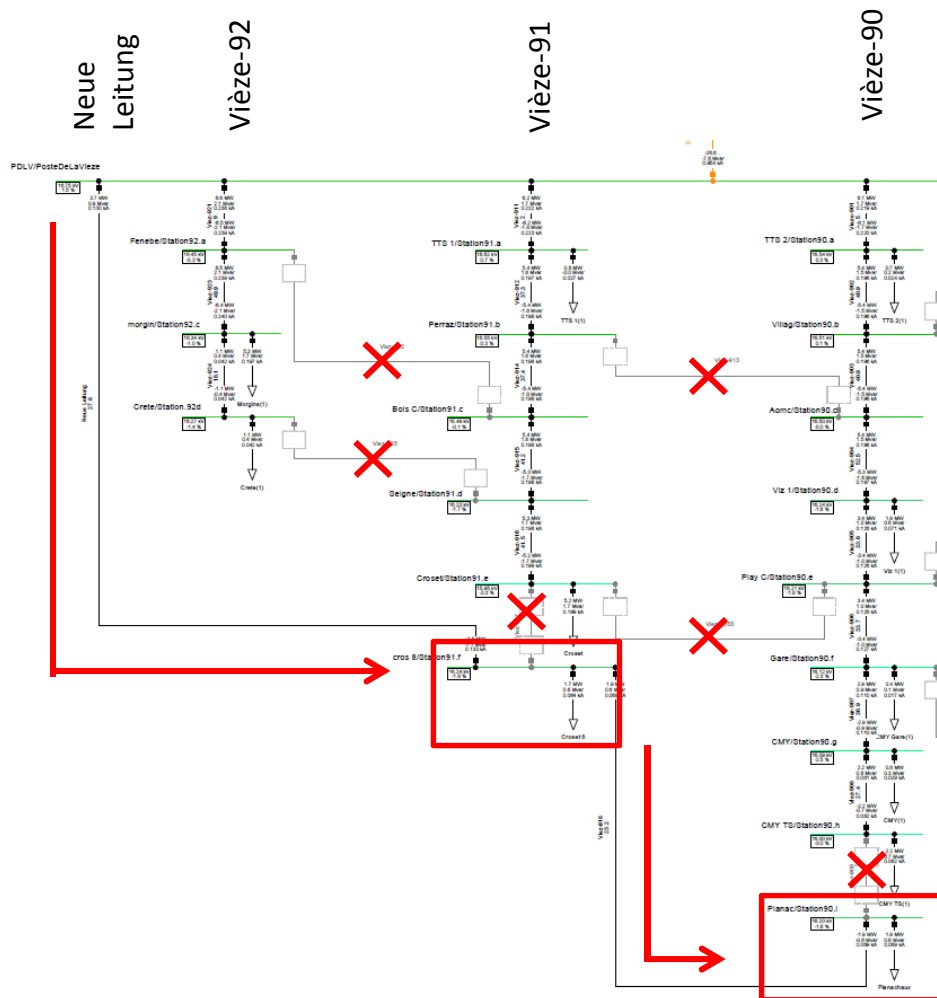


Abbildung 32: Neue Leitung speist die Stationen CROSETS 8 und PLANACHAUX C. Lastfluss in rot.

Wird die Leitung an anderen Stationen angeschlossen, können die Spannungsgrenzwerte im Normalbetrieb nicht mehr garantiert werden, somit ist die Speisung bei CROSETS 8 zwingend.

#### 4.4 Garantieren der Speisung der Station CROSETS 8 im Notbetrieb

Bei sämtlichen Lösungsansätzen (Ausnahme Möglichkeit N) kann bei einer Abschaltung des Leitungsabschnittes Viez-916 die Station LES CROSETS nicht mehr gespeist werden, wenn die Kabel nicht thermisch überlastet werden sollen (Anhänge 7,8). Eine Verstärkung der Kabel der Linie Vièze-90 führt hier nicht zum Ziel, da das leistungsfähigste zu Verfügung stehende Kabel nicht für einen grösseren Strom ausgelegt ist, als die bereits bestehenden (Bsp.: Viez-911). Somit ist ein Ausbau des Netzes nötig.

##### O) Neubau parallele Leitung zu Viez-916

Der Ausbau, bei dem die kürzeste Strecke ausgebaut werden muss, ist ein Neubau einer Leitung entlang der Viez-916.

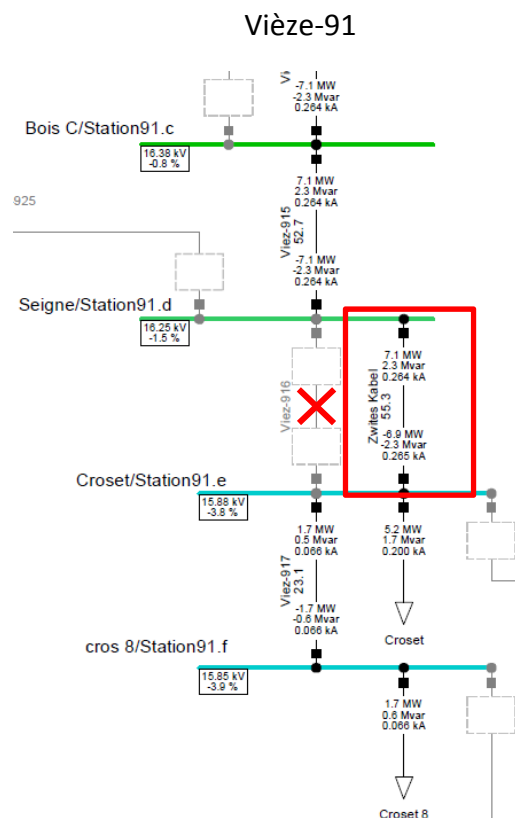


Abbildung 33: Parallele Leitung zur Viez-916 um die (N-1)-Regel zu garantieren

Wird parallel zur Leitung Viez-916 eine neue Leitung mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al verlegt, erlaubt dies die Speisung der Station LES CROSETS bei einem Ausfall der Leitung Viez-916 unter Berücksichtigung sämtlicher Grenzwerte. Dieser Ausbau dient nicht primär den Spannungsabfall zu verhindern, sondern dem Verhindern der thermischen Überlastung auf den Abschnitten der Leitung Vièze-90 bei einem Ausfall der Leitung Viez-916 (Anhang 43). Der Spannungsabfall muss trotz Neubau dieser Leitung noch korrigiert werden. Zudem ist zu beachten, dass mit dieser Lösung die bereits bestehende Leitung der Vièze-916 so belassen werden kann und als Redundanz genutzt werden kann. Dies erübrigt eine Netzverstärkung des Leitungsabschnitts Viez-916 wie unter Kapitel 3.2 beschrieben.

## 4.5 Zusammenfassung geeigneter Lösungen und Kosten

Nachfolgend sind diejenigen Lösungen aufgelistet, die überhaupt in der Lage sind, die Spannungen so zu korrigieren, dass sie innerhalb der Spannungsgrenzwerte liegen.

### **Lösung E), I)**

Nachdem sämtliche vorgängig beschriebenen Spannungskorrekturmöglichkeiten analysiert wurden, zeigt sich, dass der Einsatz eines LVR's bei den Stationen VIZ 1 oder PLAY C eine Option darstellt, den Spannungsabfall auf der Linie Vièze-90 angemessen zu vermindern. Diese Lösung ist nur sinnvoll, wenn auch Option I gewählt wird (LVR auf Linie Vièze-91 bei SEIGNEUX C oder BOIS C). Damit können auf beiden Linien die Spannungsgrenzwerte berücksichtigt werden (Anhänge 44, 45). Bei einem Ausfall des Leitungsabschnittes Vièze-916 kann aber die Speisung der Station LES CROSETS unter Berücksichtigung der thermischen Grenzen nicht garantiert werden. Dies kann mit der Zusatzmassnahme Lösung O) unterbunden werden.

### **Lösung K)**

Um zu verhindern, dass zwei LVR's benötigt werden, kann ein LVR bei der Station VIZ 1 oder PLAY C installiert und die Last von PLANACHAUX C von der Linie Vièze-90 gespeist werden. Zudem muss die Leitung Viez-904 mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al ersetzt werden. Dies erlaubt eine Einhaltung aller Grenzwerte, ausser bei einem Ausfall der Leitungsabschnitte Viez-916 und Viez-907 (Notbetrieb). Dies kann mit der Zusatzmassnahme Lösung O) und eines neuen Leitungsabschnittes bei Viez-907 oder einem zweiten LVR (was Lösung E, I gleichkäme) unterbunden werden.

### **Lösung M)**

Um zu verhindern, dass zwei LVR's benötigt werden, kann ein LVR bei der Station SEIGNEUX C oder BOIS C installiert und die Last von PLANACHAUX C von der Linie Vièze-91 gespeist werden. Zudem muss die Leitung Viez-915 mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al ausgewechselt werden. Dies erlaubt eine Einhaltung aller Grenzwerte, ausser bei einem Ausfall des Leitungsabschnittes Viez-916. Dies kann mit der Zusatzmassnahme Lösung O) unterbunden werden.

### **Lösung N)**

Die Lösung N) beinhaltet eine neue Leitung von der Poste-de-la-Vièze bis CROSETS 8. Diese Möglichkeit garantiert sämtliche Grenzwerte im Normal- wie auch Notbetrieb. Keine weiteren Massnahmen sind erforderlich.

### **Lösung O)**

Um den Betrieb der Station LES CROSETS auch im Notbetrieb zu garantieren, kann eine neue Leitung mit dem Kabel XD 400mm<sup>2</sup> Al parallel zur bestehenden Viez-916 verlegt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nur die Lösung N) die Spannungsgrenzwerte und die (N-1)-Regel ohne weitere Massnahmen berücksichtigt. Für die anderen Lösungen die dem Spannungsabfall effektiv entgegen wirken, müssen durch zusätzliche Massnahmen ergänzt werden (z.B. Lösung O) damit sie im Notbetrieb unter allen Umständen neben den Spannungsgrenzwerten auch die thermischen Grenzwerte einhalten können. Siehe dazu Tabelle 4.

**Kosten**

Die Kosten der verschiedenen Lösungen sind entscheidend für die Evaluation der Lösung. Die kostengünstigste Variante ist mit dem Wert 100 indiziert, auf den sich alle anderen Werte beziehen. Zum Beispiel eine Lösung mit Index 200 bedeutet, dass diese doppelt so teuer ist wie die kostengünstigste Variante mit Index 100. Die Indexierung beruht auf den Einschätzungen der Firma Romande Energie.

Lösung	Spannungsgrenzwerte	(N-1)-Prinzip	Nicht erfüllt	Zusatzmassnahme	Kostenindex
E), I)	✓	✗	Not Viez-916	Lösung O	100
K)	✓	✗	Not Viez-916 / Not Viez-907	neue Leitung + Lösung O	281
M)	✓	✗	Not Viez-916	Lösung O	153
N)	✓	✓	-	-	707

Tabelle 4: Zusammenfassung der Lösungen die die Spannungsgrenzwerte einhalten können.

In vorangehender Tabelle ist zu sehen, dass die kostengünstigste Variante diejenige aus der Kombination der Lösungen E) und I) ist. Die anderen Lösungen schlagen mit einem Index von 153 (Lösung M), 281 (Lösung K) und 707 (Lösung N) zu Buche.

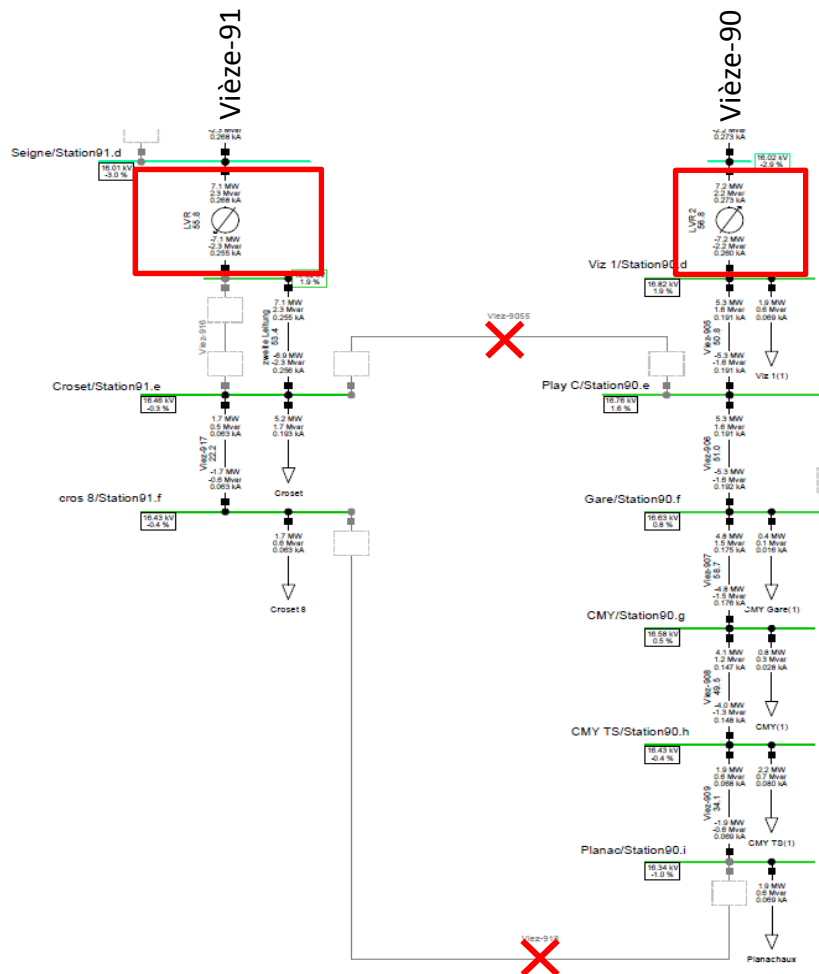


Abbildung 34: Einhaltung der Spannungsgrenzwerte dank Einsatz zweier LVR auf den Linien Vièze-90 und Vièze-91

Da die Kombination der Lösungen E und I mit Ergänzung der Lösung O sowohl die Spannungs-, wie auch die thermischen Grenzwerte garantieren kann und zudem die billigste der funktionierenden Varianten ist, wird diese als optimale Lösung des Problems vorgeschlagen (Anhänge 46, 47, 48, 49). Siehe dazu Abbildung 34.

## 5 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, damit die Spannungsgrenzen bei sämtlichen Stationen des Verteilnetzes der Firma Romande Energie im Val d'Iliez die Spannungsgrenzwerte garantiert werden können.

Von den im ersten Teil untersuchten technischen Anwendungen zur Spannungskorrektur, eignet sich ein Längsspannungsregler am besten.

Das in einem zweiten Schritt erstellte Netzmodell wurde der Lage in 35 Jahren, sprich den zukünftigen Lasten angepasst. Dadurch wurden einige Leitungsabschnitte durch leistungsfähigere Leitungen ausgewechselt.

Ausgehend von diesem neuen Netzmodell, wurden verschiedene Lösungen simuliert, um die geeignetste Lösung in Bezug auf Funktionalität, Platzierung und Kosten zu finden.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist, dass die Installation von zwei Längsspannungsreglern bei zwei verschiedenen Stationen erlaubt die Spannungsgrenzwerte einzuhalten. Dies ist die preisgünstigste Variante.

Um den Notbetrieb überall und immer zu gewährleisten, ist ein Neubau eines Leitungsabschnittes parallel zu einer bestehenden Leitung nötig.



## **6 Danksagung**

In erster Linie möchte ich meinem Betreuer, Herrn Davide Pavanello, für seine ausgiebige Unterstützung danken. Durch stets kritisches Hinterfragen und konstruktive Kritik verhalf er mir zu der vorliegenden Arbeit.

Weiter gebührt mein Dank Herrn Aurélien Lair, der mir die technischen Einzelheiten näher gebracht hat und meine Arbeit als Mitarbeiter der Firma Romande Energie betreut hat.

Auch möchte ich mich bei Romain Carreto und Nicolas Bosi bedanken, welche die Korrekturlesung der Zusammenfassung vorgenommen haben.

## **7 Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich diese Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen meiner Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken und Quellen, einschließlich Quellen aus dem Internet, entnommen sind, habe ich in jedem Fall unter Angabe der Quelle deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht. Dasselbe gilt sinngemäß für Tabellen und Abbildungen.

Sitten, 17.08.17

Dominic Kimmig

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Verteilnetzes im Val d'Illez (Romand-Energie) .....	8
Abbildung 2 : Prinzip der Shunt-Kompensation mit a) Phasendiagramm ohne Blindleistungskompensation, b) Phasendiagramm mit Blindleistungskompensation. (Grigsby, 2006).....	12
Abbildung 3 : Varianten einer SVC-Regelung (Grünbaum, Noroozian, & Thorvaldsson, 2003).....	13
Abbildung 4 : Phasendiagramm bei a) ohne SVC und bei b) mit SVC .....	13
Abbildung 5 : StaticSynchronous Compensator (STATCOM) .....	14
Abbildung 6 : Phasendiagramm bei a) ohne STATCOM und bei b) mit STATCOM.....	14
Abbildung 7: Prinzip der Seriiekompensation mit a) Phasendiagramm ohne Seriiekompensator, b) Phasendiagramm mit Seriiekompensator. (Grigsby, 2006).....	15
Abbildung 8 : Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) (Grigsby, 2006) .....	16
Abbildung 9 : Phase Angle Regulator (PAR) (Glanzmann, 2005).....	16
Abbildung 10: Quadrature-Booster in einem vermaschten Netz (UK Power Networks, 2014).....	17
Abbildung 11: Schematischer Einsatz eines Seriiekompensators mit entsprechendem Phasendiagramm (Glanzmann, 2005).....	17
Abbildung 12 : Phasendiagramme bei a) ohne Einsatz von SSSC und bei b) mit SSSC.....	18
Abbildung 13 : UPFC mit zugehörigem Zeigerdiagramm (Glanzmann, 2005).....	19
Abbildung 14: Idealer Transformator mit zwei Windungen (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).....	20
Abbildung 15: Spartransformator mit oben) Spannungserhöhung und unten) Spannungsreduktion bezüglich Primärspannung (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014) .....	21
Abbildung 16: Bauart 1.a) oben und 1.b) unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).....	22
Abbildung 17: Bauart 2 (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).....	23
Abbildung 18: Bauart 3a) oben und Bauart 3b) unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014) .....	23
Abbildung 19: Bauart 4a) mit Spartransformator oben und Bauart 4b) mit konventionellem Transformator unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014). .....	24
Abbildung 20: Bauart 5a) mit Spartransformator oben, und Bauart 5b) mit konventionellem Transformator unten (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014). .....	25
Abbildung 21: Bauart 6) (oben) mit positivem Windungsteil (unten) (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014).....	25
Abbildung 22: Bauart 7 mit einem konventionellen Transformator und den Schaltern Sekundärseitig (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014). .....	26
Abbildung 23:Modellbildung des vereinfachten Verteilnetzes.....	29
Abbildung 24: Speisung der Station PLANACHAUX C via Vièze-91 mit Lastfluss in rot.....	32
Abbildung 25: Teilspeisung der Linie Vièze-90 via Vièze-93mit thermischer Überlastung der Vièze-935. Lastfluss in rot. ....	33
Abbildung 26: Einsatz LVR eingangs der Station VIZ 1 .....	35
Abbildung 27: Teilspeisung der Vièze-91 via Vièze-92 mit Lastfluss in rot .....	36
Abbildung 28: LVR bei BOIS C.....	38
Abbildung 29: Speisung der Stationen LES CROSETS und PLAY C via Vièze-93 .....	39
Abbildung 30: LVR bei VIZ 1 und CROSETS 8 wird von der Vièze-90 gespeist. Lastfluss in rot. ....	40
Abbildung 31: LVR bei BOIS C und PLANACHAUX C wird von der Vièze-91 gespeist. Lastfluss in rot.....	41
Abbildung 32: Neue Leitung speist die Stationen CROSETS 8 und PLANACHAUX C. Lastfluss in rot. ....	43
Abbildung 33: Parallele Leitung zur Vièze-916 um die (N-1)-Regel zu garantieren .....	44
Abbildung 34: Einhaltung der Spannungsgrenzwerte dank Einsatz zweier LVR auf den Linien Vièze-90 und Vièze-91.....	46

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der Spannungs-, Strom- und Leistungsnennwerte (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014) .....	27
Tabelle 2: Überblick Anzahl Schalter (Ram, Prasanth, & Bauer, 2014) .....	27
Tabelle 3: Zusammenfassung der Eigenschaften der verschiedenen Lösungen.....	28
Tabelle 4: Zusammenfassung der Lösungen die die Spannungsgrenzwerte einhalten können. ....	46

## 10 Literaturverzeichnis

- Capponi, L. (2016). *EMV in Smart Grids*. Sion.
- Carlen, M., Slupinski, A., & Cornelius, F. (April 2015). Regulating life's up and down. *ABB Revue*.
- Glanzmann, G. (14. Januar 2005). FACTS Flexible AC Transmission Systems. *FACTS Flexible AC Transmission Systems*. Zürich, CH.
- Grigsby, L. L. (2006). *Power Systems*. Davis: Taylor & Francis Group.
- Grünbaum, R., Noroozian, M., & Thorvaldsson, B. (2 2003). FACTS – powerful systems for flexible power transmission.
- H, A., G, B., S, H., H, L., D, M., J-M, N., et al. (2014). Mehrjahrespläne für Netze NE2 und NE3. Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE.
- Harlow, J. (2006). *Electric Power Transformer Engineering, 2nd edition*. Taylor & Francis Group.
- Omlin, A. (2012). High Power Converter.
- Ram, G., Prasanth, V., & Bauer, P. (2014). *Comparative analysis of On-Load-Tap-Changing (OLTC) transformer topologies*.
- Romand-Energie. (kein Datum). Morges, Suisse: Romande Energie SA.
- Siemens AG. (2011). Discover the World of FACTS Technology. Erlangen, Deutschland.
- UK Power Networks. (2014). *Flexible Plug & Play, A guide to the first Quadrature-booster*.

## **11 Anhang**

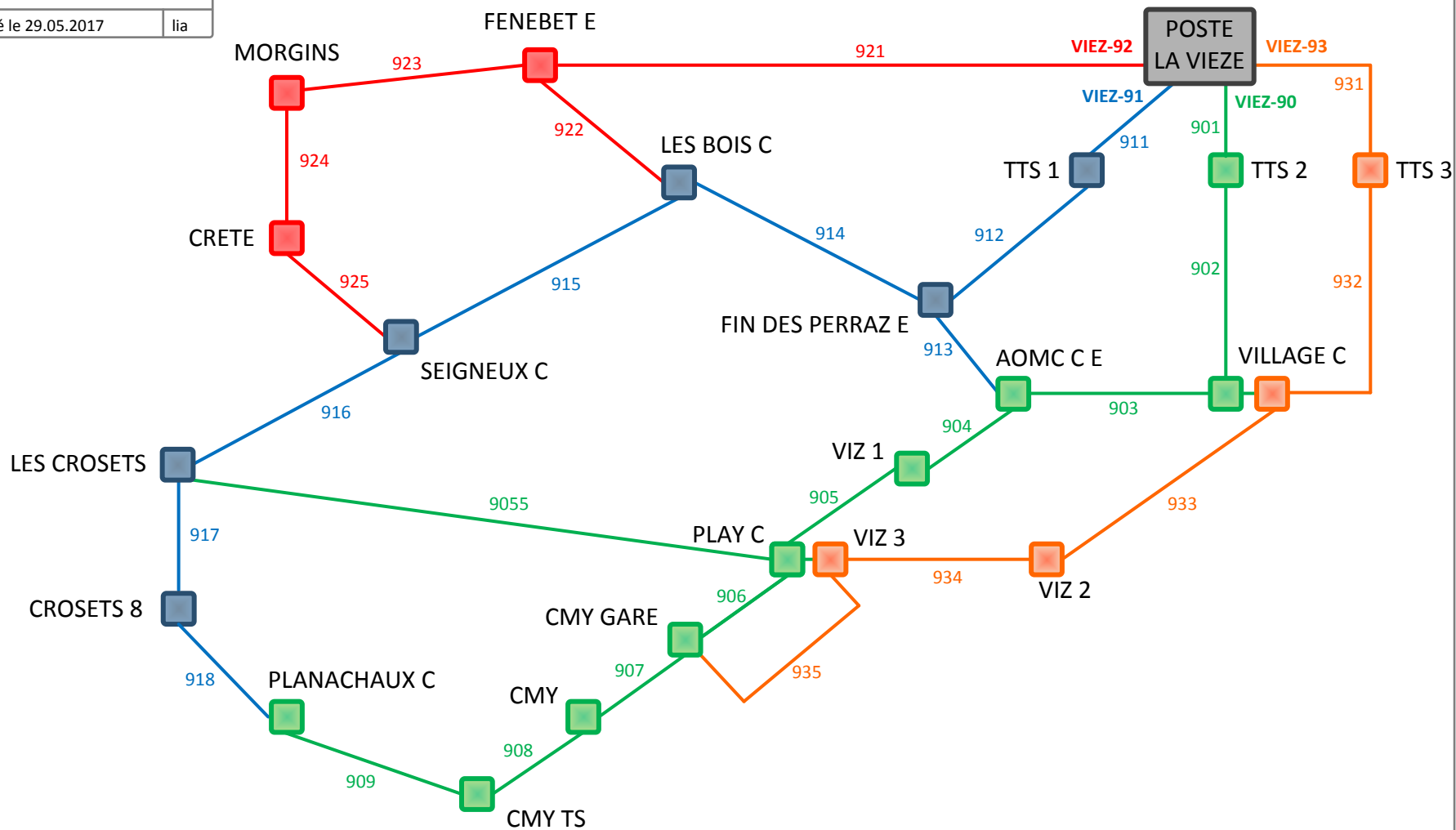
- Anhang 1: Verteilnetz der Firma Romande Energie
- Anhang 2: Kennwerte zu den einzelnen Leitungsabschnitten des Verteilnetzes
- Anhang 3-49: Diverse Simulationen des Modells mit den entsprechenden Szenarien



Schéma simplifié du réseau de distribution

Dessiné le 29.05.2017

lia



DEPARTS DISTRIBUTION DU POSTE DE LA VIEZE

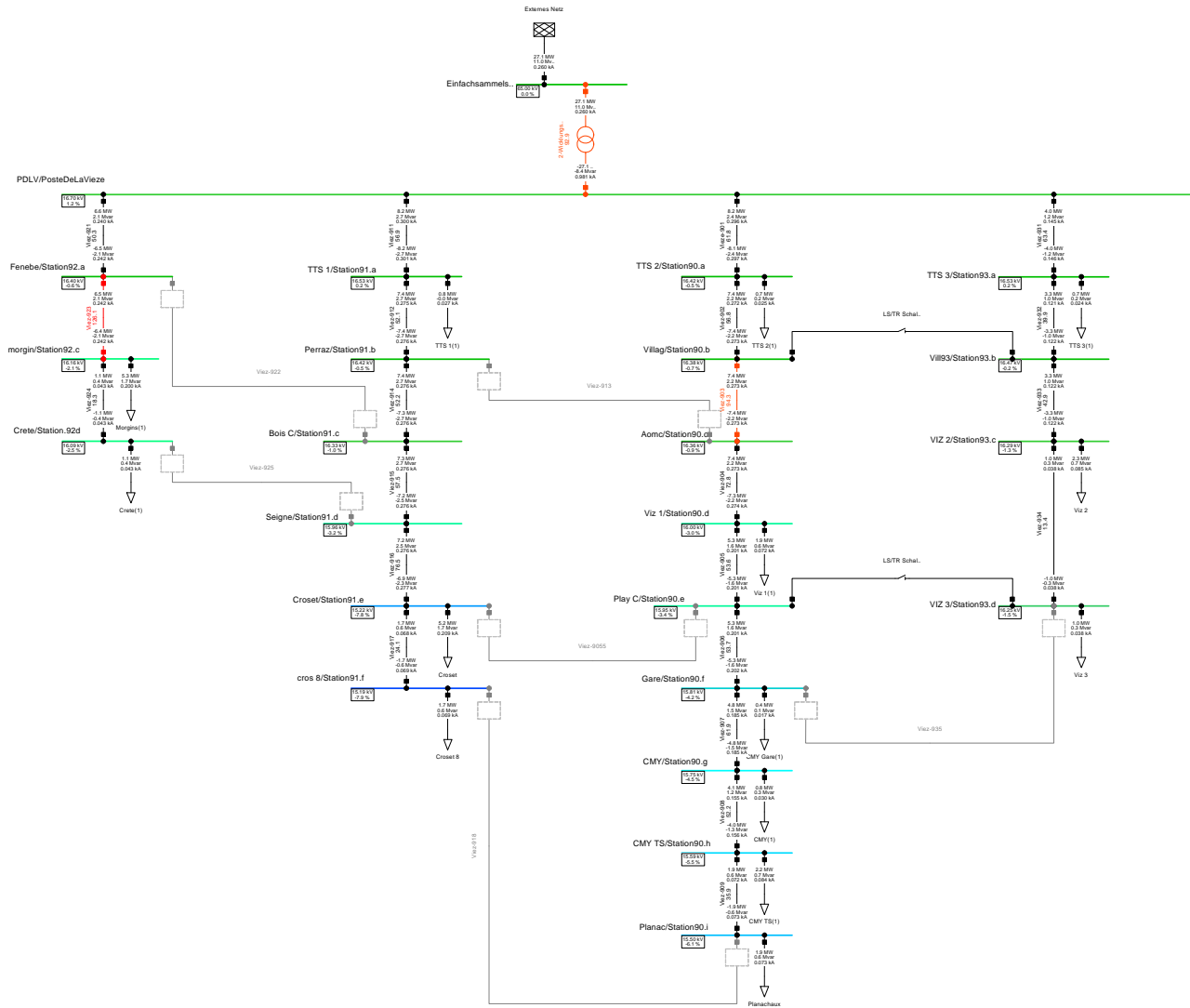
- VIEZ-90
- VIEZ-91
- VIEZ-92
- VIEZ-93

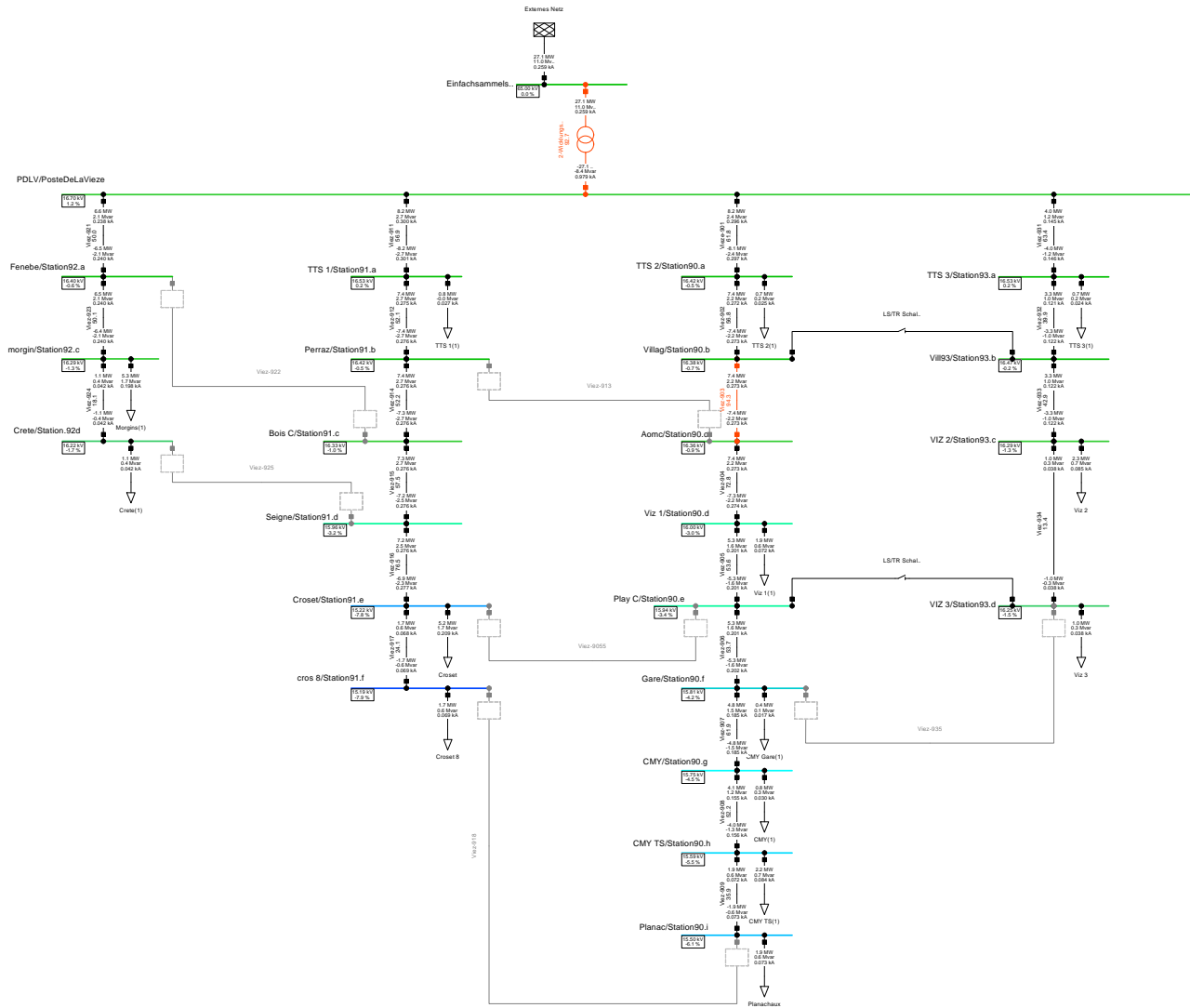
Anhang 2

VIEZ-92			I nominal [A]	R1 [Ohm/km]	X1 [Ohm/km]	B1 [uS/km]	R0 [Ohm/km]	X0 [Ohm/km]	B0 [uS/km]	Longueur [m]
921	VIEZ-92	FENEBET E	480	0.57	0.614	517.061	4.271	1.546	517.061	5752
922	FENEBET E	LES BOIS C	234	0.853	0.694	9.946	1.166	3.203	9.946	2130
923	FENEBET E	MORGINS	120	0.519	0.223	177.546	2.162	0.117	177.546	2055
924	MORGINS	CRETE	234	0.864	0.44	59.346	0.874	0.44	59.346	3860
925	CRETE	SEIGNEUX C	299	0.43	0.201	149.806	0.433	0.201	149.806	1767
VIEZ-91										
911	VIEZ-91	TTS 1	529	0.243	0.338	222.697	1.253	4.328	222.697	3225
912	TTS 1	FIN DES PERR/	529	0.156	0.235	106.298	0.89	1.568	106.298	1664
913	FIN DES PERR/	AOMC C E	230	0.077	0.037	70.6	0.077	0.037	70.6	350
914	FIN DES PERR/	LES BOIS C	529	0.122	0.179	117.128	0.919	1.39	117.128	1638
915	LES BOIS C	SEIGNEUX C	480	0.545	0.778	27.543	1.018	3.958	27.543	2575
916	SEIGNEUX C	LES CROSETS	362	1.182	1.364	347.253	3.233	4.512	347.253	6271
917	LES CROSETS	CROSETS 8	285	0.228	0.093	60.01	1.531	0.051	60.01	850
918	CROSETS 8	PLANACHAUX	299	0.235	0.125	105.872	0.597	0.094	105.872	1140
VIEZ-90										
901	VIEZ-90	TTS 2	480	0.425	0.469	406.862	3.211	1.321	406.862	4305
902	TTS 2	VILLAGE C	480	0.077	0.085	74.189	0.585	0.241	74.189	785
903	VILLAGE C	AOMC C E	289	0.038	0.036	30.463	0.18	0.08	30.463	330
904	AOMC C E	VIZ 1	376	0.645	0.447	389.998	0.645	0.447	389.998	4138
905	VIZ 1	PLAY C	376	0.141	0.097	84.823	0.141	0.097	84.823	900
906	PLAY C	CMY GARE	376	0.343	0.244	219.546	0.343	0.244	219.546	2158
907	CMY GARE	CMY	299	0.159	0.079	58.59	0.213	0.074	58.59	675
908	CMY	CMY TS	299	0.508	0.306	300.034	2.308	0.15	300.034	2999
909	CMY TS	PLANACHAUX	202	0.699	0.278	172.005	0.699	0.278	172.005	2273
9055	PLAY C	LES CROSETS	120	4.081	1.876	36.486	4.79	8.352	27.346	5235
VIEZ-93										
931	VIEZ-93	TTS 3	230	0.596	0.394	233.396	2.357	0.617	233.396	3069
932	TTS 3	VILLAGE C	305	0.233	0.212	39.677	0.54	0.81	39.677	863
933	VILLAGE C	VIZ 2	285	0.767	0.386	256.144	1.033	0.377	256.144	3259
934	VIZ 2	PLAY C	285	0.565	0.282	184.79	0.828	0.273	184.79	2370
935	PLAY C	CMY GARE	155	1.083	0.784	78.972	1.553	3.42	78.972	2990
Cable	XD 400 Al	Modèle	480	0.1053	0.0951	62.4	0.736	0.04	62.4	1000

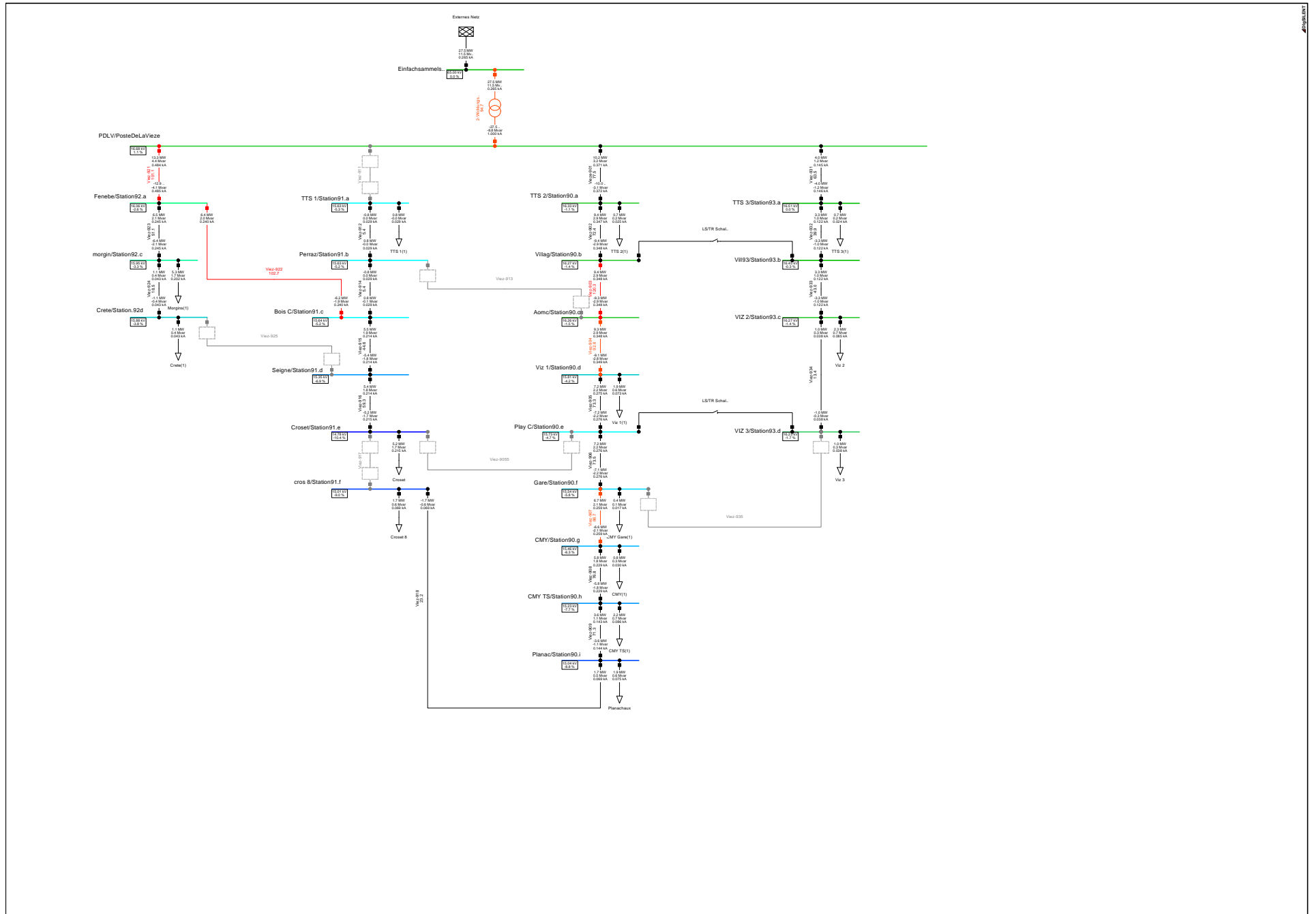
Les liaisons sont calculées pour une longueur de 1 km. Dans le modèle de calcul, z.B. pour créer la liaison 921-VIEZ-92-FENEBET-E , dessiner une liaison électrique avec une longueur de 1 km et les caractéristiques R1, X1, B1, R0, X0 et B0 indiquées sur la ligne 2 ci-dessus.

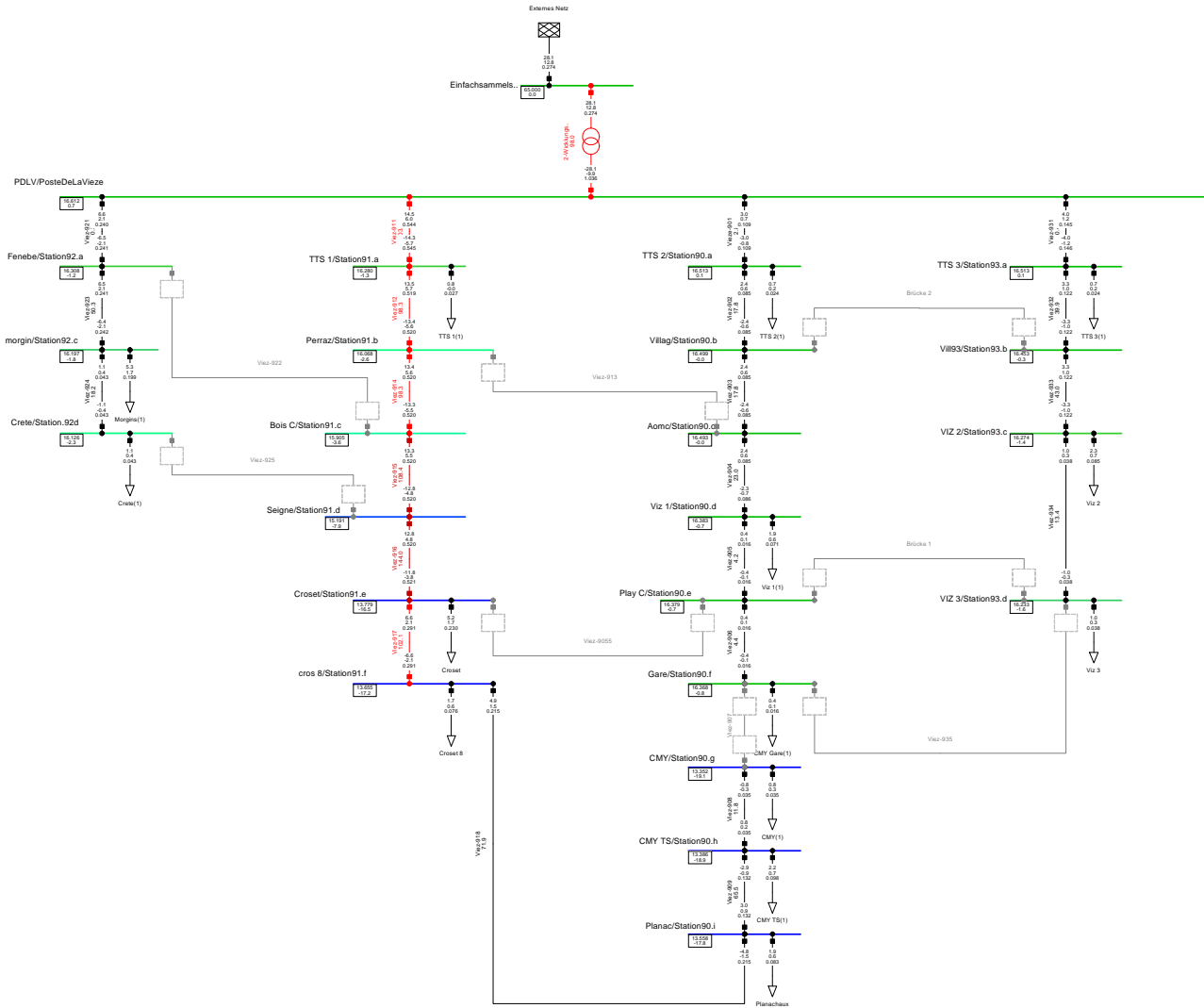
	CHARGES	KW	PF	Amps E	Amps S	Diff Amps	KW
VIEZ-92	MORGINS	5'307	0.95	233	41	192	5'587
	CRETE	1'133	0.95	41	0	41	1'193
VIEZ-91	TTS 1	774	0.95	443	415	28	815
	LES CROSETS	5'224	0.95	251	62	189	5'499
	CROSETS 8	1'714	0.95	62	0	62	1'804
VIEZ-90	TTS 2	663	0.95	282	258	24	698
	VIZ 1	1'907	0.95	258	189	69	2'008
	CMY GARE	442	0.95	189	173	16	466
	CMY	774	0.95	173	145	28	815
	CMY TS	2'156	0.95	145	67	78	2'270
	PLANACHAUX	1'852	0.95	67	0	67	1'950
VIEZ-93	TTS 3	663	0.95	143	119	24	698
	VIZ 2	2'267	0.95	119	37	82	2'386
	VIZ 3	1'023	0.95	37	0	37	1'077

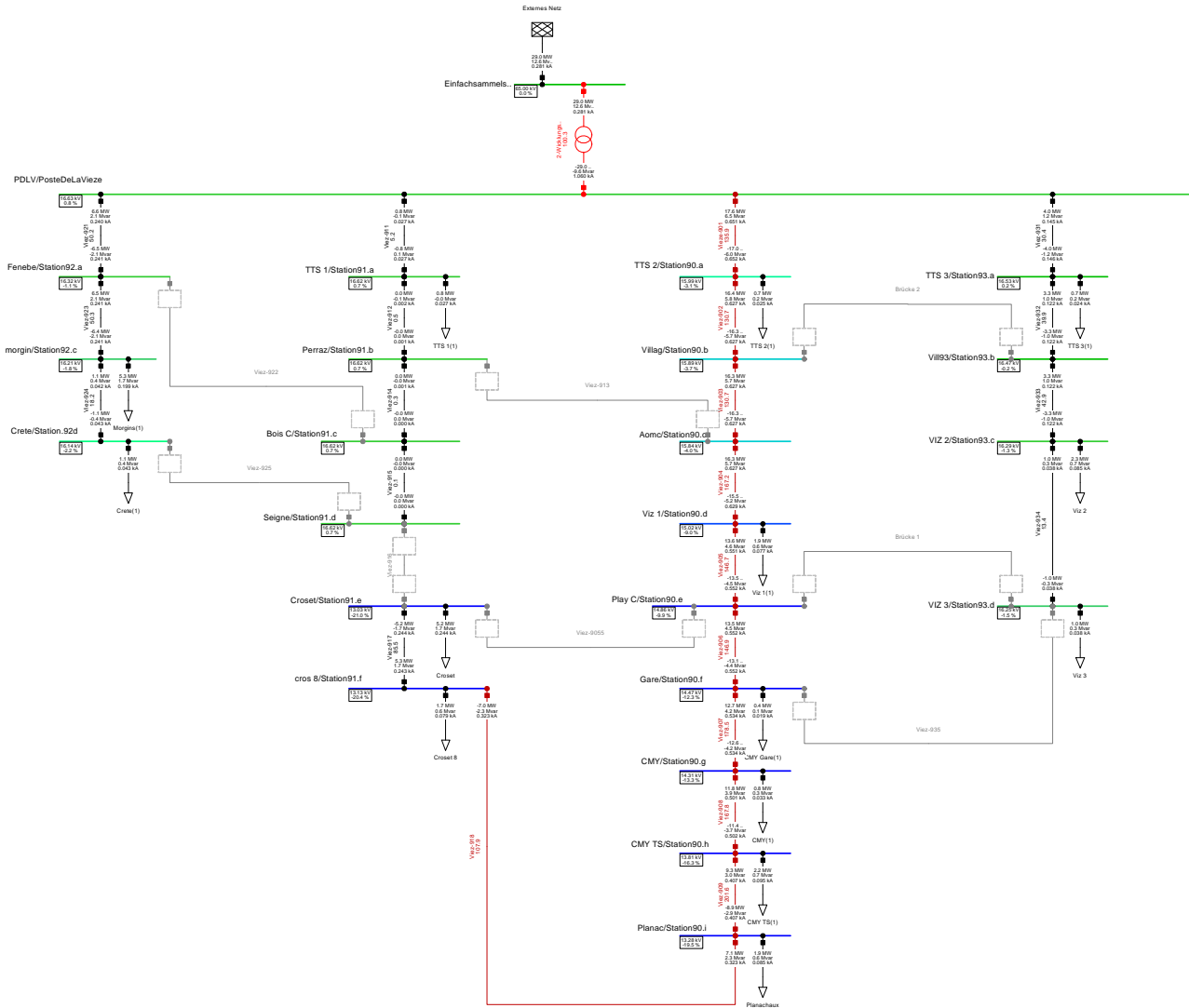












Anhang 8

