

Zuverlässigkeit von Kraftwerken und NetzenHausaufgabe, SS2025 – Versorgung einer Mittelspannungsabgangs**Gegeben:**

Ein DSO plant in der Mittelspannungsebene (20 kV-Netz) die Adaptierung der Anbindung eines Kunden an der Netzebene 5. Aufgrund der Größe des Verbrauchers möchte dieser eine Vereinbarung über die Versorgungssicherheit mit dem Netzbetreiber abschließen. Diese Vereinbarung umfasst Grenzwerte für die Ausfallhäufigkeit der Versorgung, sowie die Dauer der jährlichen Nicht-Verfügbarkeit der Versorgung.

Aktuell ist der Netzkunde über eine eigene Stichleitung mit 5 km Länge am Abgang V1 am Umspannwerk A (UW A), welches in H-Schaltung (siehe Abb. 2) aufgebaut ist, angebunden.

In der Nähe des Netzkunden endet eine andere Mittelspannungsstichleitung welche bis zum Kunden verlängert werden könnte (siehe Abb. 1). Diese Leitung hat ihren Ursprung im **UW B** am Abgang V1. Im Falle eines Ausfalls der Anbindung würde durch Umschalten auf die verlängerte Leitung die Möglichkeit bestehen die Versorgung des Kunden wiederherzustellen. Da derzeit keine Möglichkeit zur ferngesteuerten Umschaltung besteht, wird für diese Maßnahme auf Basis der geografischen Lage eine durchschnittliche Umschaltdauer von 50 Minuten erwartet. Das UW B weist eine Doppelsammelschienen-Topologie (siehe Abb. 3) auf.

Der langfristige Raumentwicklungsplan der Region rund um das **UW A** lässt auf eine möglicherweise notwendige Verdichtung von Netzanschlüssen zu einem späteren Zeitpunkt schließen. Alternativ besteht somit die Möglichkeit zukünftige Investitionen in einen Umbau von **UW A** auf Doppelsammelschienen-Topologie vorzuziehen.

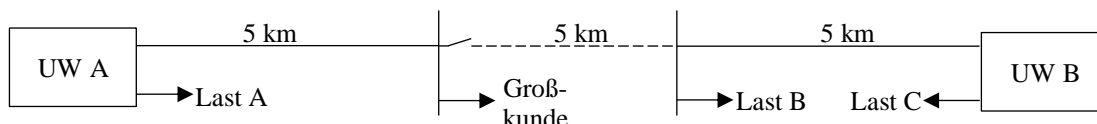


Abb. 1: Skizze des möglichen Ausbaus der Verbindungen. Die strichlierte Leitungsverbindung soll errichtet werden.

Schutzkonzept und Fehlerbehebungsstrategie:

Alle im Netz zu betrachtenden Schutzeinrichtungen sind Sekundärschutzgeräte. Ein Auslösebereich umfasst im Regelfall an jedem Ende, welches zur Versorgung des betrachteten Abschnitts in der Lage ist, einen Leistungsschalter.

Im gesamten Beispiel wird angenommen, dass es im Mittelspannungsnetz zu keiner Lastflussrichtungsumkehr kommen kann. Das bedeutet, dass das Mittelspannungsnetz immer den Charakter einer Last aufweist.

Anspeiseleitungen LTG1 und LTG2:

Beide Leitungen sind in den jeweiligen Gegenstationen mit einem Leistungsschalter an die dortige Sammelschiene angebunden. Der Leitungsschutz wird durch einen Distanzschutz bereitgestellt und wirkt auf den jeweiligen Leistungsschalter.

Transformatorschutz:

Die Transformatoren beider Stations-Topologien sind jeweils mit einem Differentialschutzgerät überwacht.

Die zugehörigen Strom- und Spannungswandler für das System sind dabei innerhalb des Auslösebereiches der Leistungsschalter, also z.B zwischen HLS11 und T1, angeordnet. Die Wandler sind jeweils mit mehreren Wandler-Kernen für Schutztechnik ausgestattet und stellen anderen Schutzgeräten ebenfalls die gewandelten Ströme und Spannungen zur Verfügung.

Zusätzlich sind die Transformatoren auf beiden Seiten mit einem Unabhängigen Maximalstrom-Zeit-Schutz (UMZ) als Zusatzschutz mit verzögerter Auslösung ausgestattet. Diese dienen zum Schutz der Transformatoren vor Fehlerströmen mit Ursachen außerhalb des Schutzbereiches (= Bereich zwischen den Stromwandlern).

Schutz der Abgänge:

Der Schutz der Abgänge erfolgt über einen ungerichteten UMZ. Die Strominformation stammt von jeweils einem zusätzlichen Wandler-Kern der Stromwandler für den Transformatorschutz. Beispielsweise in der Doppelsammelschienen-Konfiguration vom Stromwandler zwischen T1 und LS31 für den Abgang V1.

H-Schaltung:

Es ist ersichtlich, dass die Station den Charakter einer eingeschliffenen niederrangigen Station hat. Auf der 110 kV-Seite besitzt die Station keine Leistungsschalter. Das hat zur Folge, dass dieser Teil der Umspannerstation aus Sicht der Schutztechnik zum Freileitungssystem gehört.

Doppelsammelschiene:

Der Schutz der Doppelsammelschiene wird über vier gerichtete UMZ – Geräte bereitgestellt. Die Vorwärtsrichtung der Schutzgeräte ist in Richtung der Sammelschiene (anspeiseseitig) bzw. in Richtung der Abgänge. Die Auslösezeiten sind dabei so gestaffelt, dass Sammelschienenfehler in Schnellzeit ausgelöst werden. In der anderen Richtung der Anregung erfolgt die Auslösung verzögert.

Die Schutzgeräte sind in der Auslöselogik mit der sogenannten „rückwertigen Verriegelung“ verschaltet:

Erfolgt eine Anregung eines der anspeiseseitigen UMZ-Relais in Rückwärtsrichtung, so blockiert dieses über eine Signalleitung die Auslösung der abgangsseitigen UMZ-Relais in Rückwärtsrichtung in der Schnellzeit. Die Ursache für den Fehlerstrom liegt in dieser Situation außerhalb der Station.

Liegt der Fehler im Bereich der Sammelschiene, so ist dieser in der Vorwärtsrichtung der Relais auf Seite der Anspeisung und in Rückwärtsrichtung

aus Sicht der abgangsseitigen Relais. Hier erfolgt keine Blockierung der Auslösung.

Die Stromwandler für die anspeiseseitigen Schutzgeräte sind zwischen den Leitungstrennern (LTR11 und LTR12) und den nachfolgenden Leistungsschaltern (LS11 und LS12) angeordnet. Diese Wandler verfügen auch über Wandlerkerne für die Distanzschutzgeräte für den Schutz der 110 kV-Leitungen.

Abgangsseitig werden eigene Wandlerkerne der primärseitigen Stromwandler der Transformatoren (siehe Beschreibung des Transformatorschutzes) verwendet.

Der Kuppelleistungsschalter wird von keinem Schutzgerät angesteuert. Daher erfolgt die Auslösung nicht Sammelschienen-selektiv.

Im Falle eines Fehlers ist anzunehmen, dass der Netzbetreiber jederzeit genug Einsatzteams zur Verfügung hat, um Umschaltungen im Umspannwerk parallel zu Umschaltungen und Arbeiten im Feld durchführen zu können. Die Teams starten zugleich. Daher müssen Sie keine weiteren Zeitdauern und Strategien berücksichtigen. Die entsprechenden Dauern sind unter der Nichtverlässlichkeit angeführt.

Beachten Sie, dass nach der Umschaltung der Versorgung von UW A auf UW B im Feld trotzdem die Versorgung von UW B aus ausfallen kann.

Beachten Sie weiters, dass es möglich ist, dass eine Umschaltung im UW die Versorgung der Abgänge wiederherstellen kann. Ist dies der Fall ist eine Umschaltung im Feld nicht mehr notwendig und wird daher auch nicht mehr durchgeführt. Es wird auch vorerst auf eine Umschaltung verzichtet, wenn der Ausfall im Versorgungspfad A einem Ausfall im Versorgungspfad B folgt. In diesem Fall wird ein Team zur Umschaltstelle zur Umschaltung geschickt, wenn die Versorgung im Pfad B schneller hergestellt werden kann als im Pfad A

Weiters ist anzunehmen, dass in der Variante 2 der nicht betroffene Kunde bei einer Umschaltung im Feld nur kurzfristig für die Änderung der Trennerstellung von der Versorgung unterbrochen wird. Aufgrund der kurzen Unterbrechungsdauer wird diese in der Berechnung vernachlässigt.

Nehmen Sie abschließend an, dass nach Abschluss aller Reparaturen der Normalschaltzustand im Netz wiederhergestellt wird. Auch hierbei können Sie die Dauer der Versorgungsunterbrechung beim Kunden für die Umschaltung vernachlässigen.

Gesucht:

Ermitteln Sie für den genannten Großkunden die Zuverlässigkeitskenngrößen "Defizithäufigkeit $H [1/a]$ ", "Nichtverlässlichkeit $NV [h/a]$ ", "Defizitleistung $P [MW/a]$ " und "Defizitenergie $E [MWh/a]$ " in der aktuellen Ausbaustufe und in den beiden genannten Ausbauvarianten. Stellen Sie die Ergebnisse tabellarisch gegenüber.

Entscheiden Sie am Ende, welche Ausbauvariante Sie bevorzugen würden und welche Werte Sie darauf aufbauend als Netzbetreiber in einem Vertrag über die Versorgungszuverlässigkeit akzeptieren würden.

Für die Analyse der Ausbauvarianten dürfen Sie folgende Vereinfachungen treffen: Betrachtet werden in den Umspannwerken nur Ausfälle 1. Ordnung (= ein Betriebsmittel ist ausgefallen) und die Anbindung der 110kV-Leitungen erfolgt an ideal zuverlässige Netzknoten. Ebenfalls dürfen Sie die Trennschalter zur Umschaltung der Versorgungsleitung beim Kunden als ideal zuverlässig betrachten.

Hinweise:

Ermitteln Sie zuerst die gesuchten Parameter für die Abgänge V1 und V2 der beiden Umspannwerktopologien. Erst im nächsten Schritt betrachten Sie die Auswirkung auf die Versorgung des Kunden. Vereinfachen Sie die Betrachtung aus Sicht des Kunden indem Sie die Strukturen der Anbindung des Kunden bestehend aus den Kabeln und den Umspannwerken passend zu fiktiven Ersatzkomponenten zusammenfassen. Nutzen Sie die Eigenschaft unabhängiger Komponenten aus (Stichwort Serien- oder Parallelstruktur). Für die Modellierung der Versorgung des Kunden (Normalbetrieb, Ausfall Anbindung über UW A, Umschaltung auf Anbindung über UW B, ...) wählen Sie eine geeignete Darstellung als Markov-Kette und ermitteln damit die kundenspezifischen Parameter aus der Angabe. Achten Sie darauf, dass sie das System mit den zusammengefassten Strukturen vollständig (= Betriebs- und Ausfallzustände berücksichtigt) in ihrer Darstellung erfassen!

Zur Berechnung der Parameter im Umspannwerk empfiehlt sich die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogrammes

Zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit beschreiben Sie die Ausfallwirkungen für die H-Schaltung und die Doppelsammelschienenanlage in je einer Tabelle. Beispiel für H-Schaltung:

Ausgefallenes Element	Zuverlässigkeitskenngröße, Typ	Ausgefallene Verbraucher	
		Nach Fehler	Nach Umschaltung
LTG1	LT	V1 + V2	/
LTG2	LT	V1 + V2	/
HTR11	TR	V1 + V2	V1
...

Defizithäufigkeit: Unterbrechungshäufigkeit der Abgänge V1 oder V2 zufolge von Ausfällen der in den Abbildungen benannten Betriebsmittel (LTG1, HTR11, LTR11, ...). Ausfälle der nicht in den Abbildungen benannten Betriebsmittel werden nicht berücksichtigt.

Nichtverlässlichkeit: Produkt aus Defizithäufigkeit und Dauer der Ausfallsituation. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der Dauer bis zum Vollzug der Korrekturschaltung und der Dauer bis zur Reparatur der Komponente. Für die Korrekturschaltdauern in den Umspannwerken ist unabhängig von der Anzahl der vorgenommenen Schalthandlungen der in der Tabelle angegebene Wert von 0,25h einzusetzen. In der Dauer von 15min sind sämtliche Schalthandlungen zur Wiederversorgung abgeschlossen! Außerhalb der Umspannwerke beträgt diese Dauer 40 Minuten.

Defizitleistung: Produkt aus Defizithäufigkeit und unterbrochener Verbraucherlast.

Defizitenergie: Produkt aus Nichtverlässlichkeit und unterbrochener Verbraucherlast.

Versorgungszuverlässigkeit der Anlage: Summen der entsprechenden Größen (Defizitleistung und Defizitenergie), welche durch Ausfälle der benannten Betriebsmittel verursacht werden. Ausfälle, welche keine Versorgungsunterbrechung bewirken, gehen nicht in die Summen ein.

H-Schaltung (H2T-2 Variante)

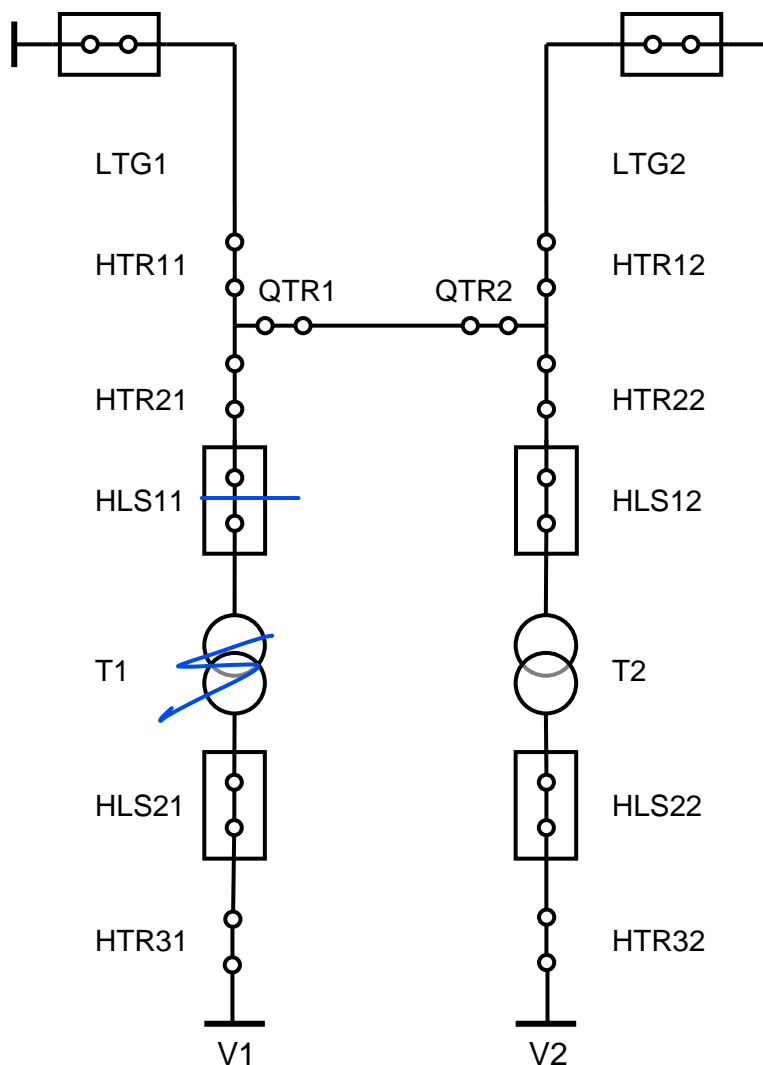


Abb. 2: Normalschaltzustand H-Schaltung

Doppelsammelschiene

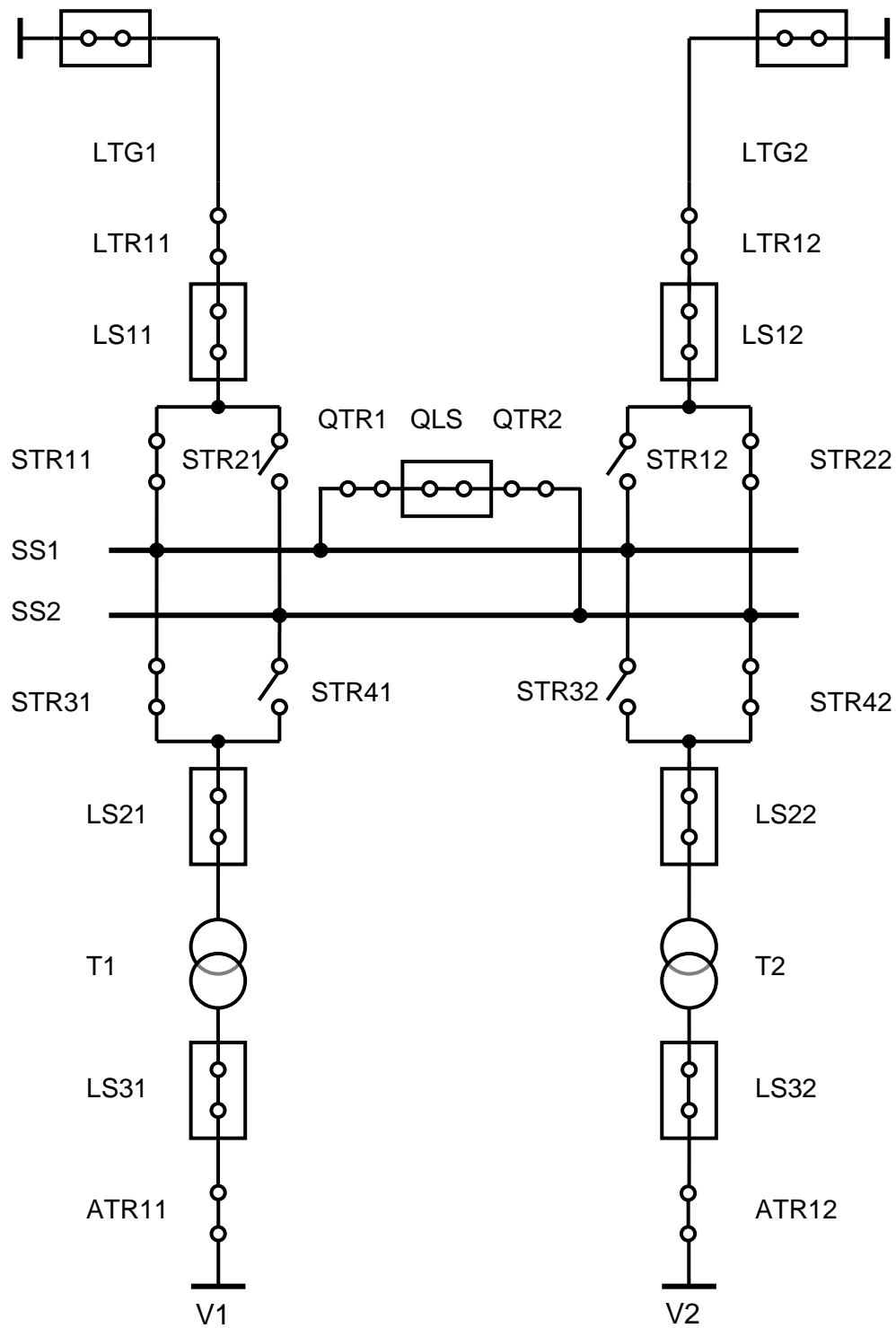


Abb.: 3 Normalschaltzustand Doppelsammelschiene

Zur Vereinfachung der Abbildungen werden die Trenner, welche sich in den Kabelzweigen LTG1 und LTG2 rechts und links oben nicht eingezeichnet.

Kabellängen für LTG1 und LTG2: 5 km.

Verbraucherlasten:

$$P_A = 5 \text{ MW}$$

$$P_{GK} = 5 \text{ MW}$$

$$P_B = 5 \text{ MW}$$

$$P_C = 5 \text{ MW}$$

Zuverlässigkeitsdaten der Netzelemente

Netzelement	Typ	Ausfallhäufigkeit [1/a]; [1/(km*a)]	Ausfalldauer [h]
110-kV-Kabel	LTG	0,005	80
20-kV-Kabel	LTG	0,001	26
110/20-kV-Netzumspanner	T	0,015	28
Trenner	TR	0,000120 + IPS	72
Leistungsschalter	LS	0,000259	72
Sammelschiene	SS	0,000148	72
Korrekturschaltdauer im UW			0,25
Korrekturschaltdauer außerhalb des UW			2/3

Berechnung vom individuellen Parametersummand IPS ausgehend von der Quersumme q Ihrer Matrikelnummer:

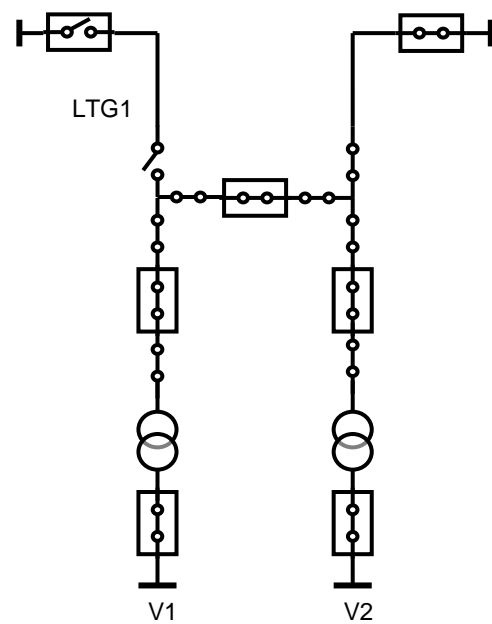
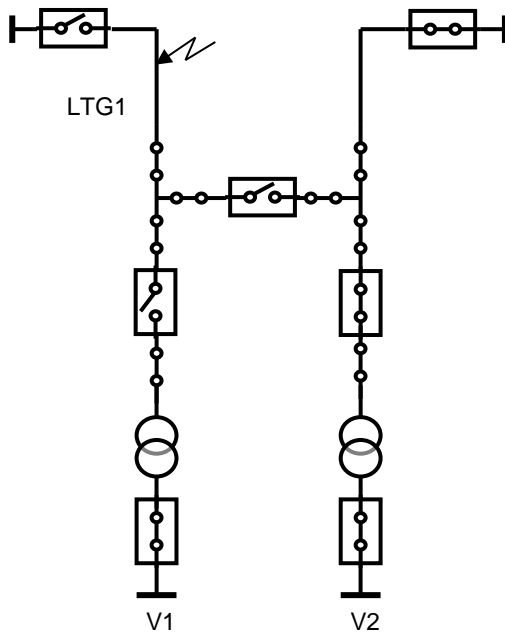
$$IPS = ((q * 5) \bmod 40) * 10^{-4}$$

Beispiele zur Ermittlung der Zuverlässigkeitsgrößen infolge von Betriebsmittelausfällen:

Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung

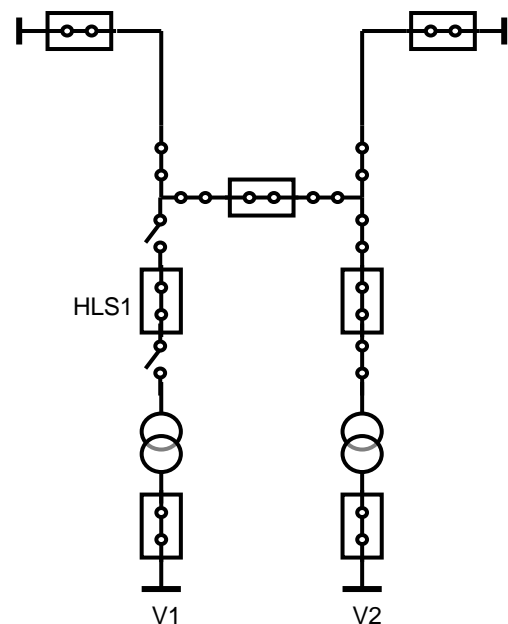
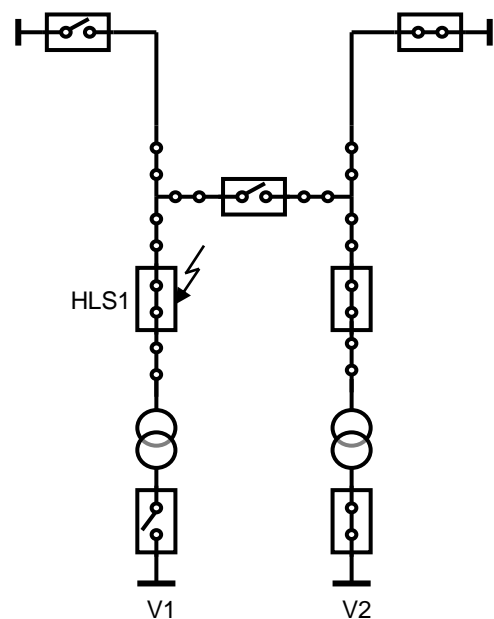
Ab Korrekturschaltung bis zur Reparatur

1.) Ausfall von Kabel LTG1 bei H-Schaltung:



Verbraucher V1 ausgefallen $H=0,0145 \text{ 1/(km.a)} * 5 \text{ km}=0,0725 \text{ 1/a}$ $NV=0,0725 \text{ 1/a} * 0,25 \text{ h}=0,018 \text{ h/a}$ $P_a=0,0725 \text{ 1/a} * 5 \text{ MW}=0,3625 \text{ MW/a}$ $E_a=0,018 \text{ h/a} * 5 \text{ MW}=0,091 \text{ MWh/a}$	Leitung freigeschaltet, Verbraucher wiederversorgt. $NV = 0 \text{ h/a}$ $P_a = 0 \text{ MW/a}$ $E_a = 0 \text{ MWh/a}$
--	---

2.) Ausfall von Leistungsschalter HLS1



Verbraucher V1 ausgefallen $H=0,00259 \text{ 1/a}$ $NV=0,00259 \text{ 1/a} * 0,25 \text{ h} = 0,000648 \text{ h/a}$ $P_a=0,00259 \text{ 1/a} * 5 \text{ MW} = 0,01295 \text{ MW/a}$	HLS1 freigeschaltet, V1 weiterhin aus $H=0,00259 \text{ 1/a}$ $NV=0,00259 \text{ 1/a} * 72 \text{ h} = 0,18648 \text{ h/a}$ P_a bleibt bei den $0,01295 \text{ MW/a}$
--	--

$E_a = 0,000648 \text{ h/a} \cdot 5 \text{ MW} = 0,00324 \text{ MWh/a}$	$E_a = 0,18648 \text{ h/a} \cdot 5 \text{ MW} = 0,9324 \text{ MWh/a}$
---	---

Gesamter Ausfall:

$$H = 0,00259 \text{ 1/a}$$

$$NV = 0,000648 \text{ h/a} + 0,18648 \text{ h/a} = 0,187128 \text{ h/a}$$

$$P_a = 0,01295 \text{ MW/a}$$

$$E_a = 0,00324 \text{ MWh/a} + 0,9324 \text{ MWh/a} = 0,93564 \text{ MWh/a}$$

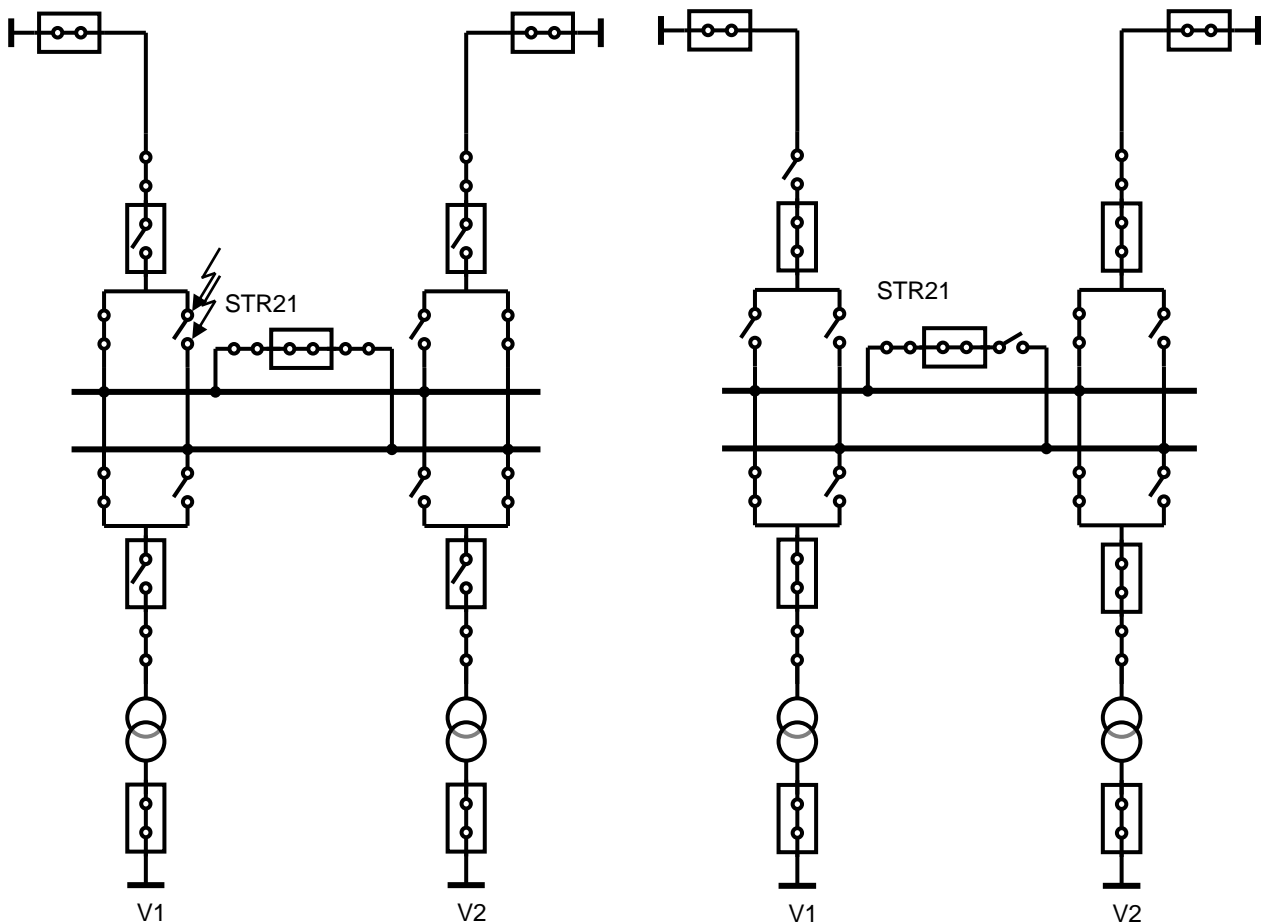
Achtung: Ausfallhäufigkeit zählt nur einmal, da Zustand vor und nach Korrekturschaltung zum selben Ereignis gehört, detto Defizitleistung.

Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung

Ab Korrekturschaltung bis zur Reparatur

3.) Ausfall von Sammelschientrenner STR21

Annahmen: 1.) Sammelschienendifferentialschutz liegt vor (zur Angabe abweichende Annahme!)

2.) Fehler wirkt sich auf beide Sammelschienen aus.

Verbraucher V1+V2 ausgefallen $H = 0,00144 \text{ 1/a}$ $NV = 0,00144 \text{ 1/a} \cdot 0,25 \text{ h} = 0,00036 \text{ h/a}$ $P_a = 0,00144 \text{ 1/a} \cdot 10 \text{ MW} = 0,0144 \text{ MW/a}$ $E_a = 0,00036 \text{ h/a} \cdot 10 \text{ MW} = 0,0036 \text{ MWh/a}$	Freischnitten von STR21 und SS2, Umlegen von Last V2 auf SS1, V1+V2 wird von Leitung LTG2 versorgt. $NV = 0 \text{ h/a}$ $P_a = 0 \text{ MW/a}; E_a = 0 \text{ MWh/a}$
--	--

Gesamter Ausfall: $H=0,00144 \text{ 1/a}; NV=0,00036 \text{ h/a}; P_a=0,0144 \text{ MW/a}; E_a=0,0036 \text{ MWh/a}$.

Versorgungszuverlässigkeiten der Anlage:

H-Schaltung:

$$H_H = 0,0725 \text{ 1/a} + 0,00259 \text{ 1/a} + \dots$$

$$NV_H = 0,018 \text{ h/a} + 0,186998 \text{ h/a} + \dots$$

$$P_{a_H} = 0,3625 \text{ MW/a} + 0,01295 \text{ MW/a} + \dots$$

$$E_{a_H} = 0,091 \text{ MWh/a} + 0,93499 \text{ MWh/a} + \dots$$

Doppelsammelschiene:

$$H_{DSS} = 0,00144 \text{ 1/a} + \dots$$

$$NV_{DSS} = 0,00036 \text{ h/a} + \dots$$

$$P_{a_{DSS}} = 0,0144 \text{ MW/a} + \dots$$

$$E_{a_{DSS}} = 0,0036 \text{ MWh/a} + \dots$$