

Das Virtual Central Konzept mit PV-String-Wechselrichtern – ein Kostenvorteil

Kurt Desimpelaere
CSO - KACO new energy

Cristen Schimpf
Head of PLM & Marketing - KACO new energy

In herkömmlichen PV-Anlagen sind die String-Wechselrichter am Ende jedes Modulstrangs installiert. Im Vergleich hierzu liefert das sogenannte Virtual Central Konzept viele Vorteile. Hier sind die Wechselrichter an zentraler Stelle, meist neben dem Netzverknüpfungspunkt, errichtet. Die Vorteile von zentral installierten String-Wechselrichtern sind neben den höheren Erträgen auch eine höhere Flexibilität bei der Anlagenauslegung, eine bessere Eignung für leistungsstärkere PV-Module, ein einfacherer Zugang zu den Wechselrichtern für Wartungszwecke, die schnellere Installation und Inbetriebnahme und die Umsetzung eines hohen DC/AC-Verhältnisses.

Aber wie sieht es mit den Investitionskosten aus? In diesem Artikel werden die Investitionskosten einer PV-Anlage im konventionellen dezentralen Anlagenkonzept mit den Investitionskosten des Virtual Central Konzepts verglichen. Es wird deutlich, dass eine PV-Anlage im Virtual Central Konzept eine kostengünstige Alternative zu bestehenden Lösungen ist.

Das Virtual Central Konzept

Um den von der Sonne erzeugten Strom ins Netz einzuspeisen, werden die folgenden Schlüsselkomponenten benötigt:

- PV-Module als Gleichstromerzeuger
- DC-Kollektoren (DC-Combiner-Boxen, mehrere DC-Eingänge von Wechselrichtern oder moderne Verkabelungslösungen zur Integration von Strings ohne DC-Combiner-Boxen)

- Wechselrichter zur Umwandlung des erzeugten Gleichstroms in Wechselstrom,
- AC-Sammler zum Anschluss der Wechselrichterausgänge an den Transformator
- Transformatoren zur Umspannung auf Netzspannungsebene
- RMU-Schaltanlage zum Anschluss an den Einspeisepunkt

Es gibt zwei Möglichkeiten, die String-Wechselrichter im PV-Feld zu platzieren: Entweder dezentral, also verteilt im PV-Feld am Ende jedes Modulstrangs, oder an einem zentralen Ort innerhalb des PV-Feldes (typischerweise neben der Trafostation).

Die folgende Abbildung bietet einen schematischen Überblick über das Virtual Central Konzept:

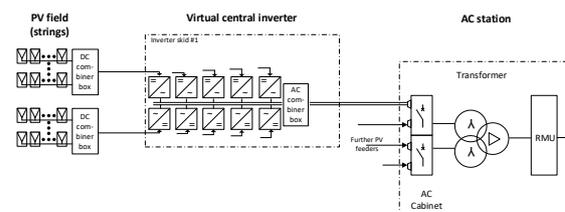


Abb.1: Schematischer Überblick

Ein Beispiel für eine reale Installation ist in dieser Abbildung dargestellt:



Abb.2: PV-String-Wechselrichter im Virtual Central Konzept

Die Wechselrichter können in vielen Fällen am nächstgelegenen Modul-Tisch installiert werden. Alternativ werden Sie auf einem Gestell montiert. Die Erdverkabelung verbindet die Wechselrichter mit der Trafostation.

Das Virtual Central Konzept ist nicht nur für große PV-Freiflächenanlagen interessant, sondern auch für größere gewerbliche und industrielle (C&I) Anwendungen. Hier werden die PV-Module typischerweise auf dem Dach installiert. Mit dem Virtual Central Konzept können die Wechselrichter außen auf Bodenhöhe eines Gebäudes oder in einem speziellen Serviceraum angebracht werden, was den Zugang deutlich vereinfacht. Somit kann sich auch der "Feuerwehrscharter" in der Nähe des Wechselrichters befinden und der Stromfluss kann im Notfall unterbrochen werden, ohne dass das Dach betreten werden muss. Darüber hinaus kann ein DC-Trennschalter in den DC-Combiner-Boxen auf dem Gebäudedach eingesetzt werden, sodass die DC-Verkabelung spannungsfrei geschaltet werden kann, bevor diese ins Gebäude eintritt.

Des Weiteren kommt eine zentrale Platzierung der Wechselrichter auch einem geringeren Serviceaufwand zugute. Die zu wartenden Geräte befinden sich an einem Ort, anstatt über das gesamte PV-Feld verteilt zu sein. Gerade bei größeren PV-Freiflächenanlagen darf dieser Faktor nicht vernachlässigt werden.

Vergleich der Gesamtkosten - Ansatz

Im Folgenden werden die Systemkosten einer PV-Anlage im konventionellen dezentralen Konzept mit einer PV-Anlage im Virtual Central Konzept verglichen. Um dies praxisorientiert zu tun, wurde eine PV-Anlage auf der Basis von auf dem Markt verfügbaren Komponenten konzipiert. Die Anlagenplanung und die Auslegung der Komponenten wurden mit der Simulationssoftware "PV planet" berechnet.

Entscheidend für das Virtual Central Konzept ist der Wechselrichtertyp. Nur Wechselrichter mit einem einzigen DC-Eingang, ergänzt durch einen DC-Kollektor (siehe oben), können verwendet werden, um ein Virtual Central Konzept zu erstellen. Wechselrichter mit mehreren DC-Eingängen, wie z.B. Multi-MPPT-Geräte, eignen sich nicht für ein Virtual Central Konzept, da sie nahe an einzelnen PV-Strings montiert werden müssen.

Die folgende Simulation betrachtet beide Topologien – Virtual Central und dezentral – und berücksichtigt monokristalline PV-Module mit 390 W.

Verwendete Komponenten

Um einen idealen Vergleich zwischen beiden Konzepten zu erhalten, wurde eine PV-Anlage von 6,0 MVA mit folgenden Wechselrichtern simuliert:

	Dezentraler Wechselrichter	Virtual Central Wechselrichter
AC-Ausgangsleistung	185kVA	165kVA
MPP-Tracker pro Wechselrichter	9	1
Max. DC-Spannung pro MPPT	1500V	1500V
Max. Strom pro MPPT	26A	183A
AC-Spannung	800V	660V
Nennstrom	3x134.9A	3x144.4A

Abb.3: Daten der Wechselrichter

Diese Wechselrichter wurden ausgewählt, da sie sich in der gleichen Leistungsklasse befinden, wobei der Hauptunterschied die Anbindung der DC-Kabel ist.

Die dezentralen Wechselrichter werden direkt am PV-Montagegestell mit jeweils zwei Strings an einem MPPT installiert und über ein 3-phasiges Erdkabel mit der Trafostation verbunden. Es werden keine DC-Combiner-Boxen oder separate Wechselrichter-Gestelle benötigt.

Die Virtual Central Wechselrichter werden in der vorliegenden Variante auf einem Gestell neben der Trafostation montiert, was mit

zusätzlichen Kosten verbunden ist. Die DC-Combiner-Box sammelt die Leistung der PV-Module (z.B. 30 Module pro String) und wird in der Regel an der Unterkonstruktion der PV-Module montiert. In unserer Simulation wurde eine DC-Combiner-Box mit 20 String-Eingängen gewählt. Die Verbindung zwischen DC-Combiner-Box und Wechselrichter erfolgt über 2x1500 V DC Erdkabel.

Die gesamte installierte AC-Wechselrichterleistung des Virtual Central Systems (6.270 kVA) entspricht nahezu der des dezentralen Ansatzes (6.290 kVA). Aufgrund der unterschiedlichen Wechselrichterleistungen kommen 34 dezentrale Wechselrichter vs. 38 Virtual Central Wechselrichter zum Einsatz.

Vergleich der Investitionskosten

Die PV-Module, die Unterkonstruktion und die Trafostation werden beim Vergleich der Investitionskosten nicht berücksichtigt, da diese bei beiden Topologien gleich sind. Wir fokussieren uns auf die Elemente, deren Kosten sich unterscheiden. Dazu gehören die DC-Combiner-Boxen, Wechselrichter, Montagekosten, AC-Sammler, AC-Schaltschränke sowie die Verkabelung. Auch wenn diese Teile der PV-Anlage nur 10-15% der gesamten Anlagenkosten darstellen, sind die Einsparungen durch das Virtual Central Konzept deutlich spürbar.

Der Vergleich zwischen den Investitionskosten beider Konzepttypen – dezentral vs. Virtual Central – zeigt 10% höhere Systemkosten für das dezentrale Anlagenkonzept:

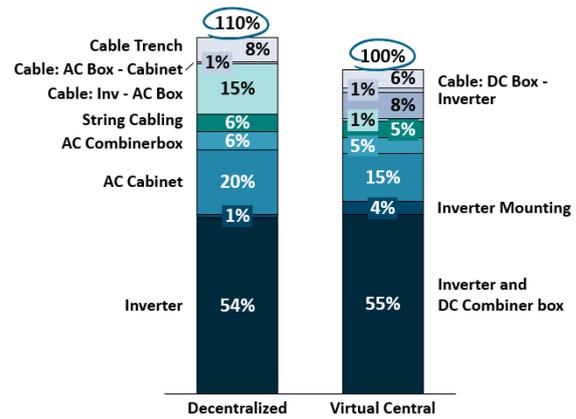


Abb.4: Vergleich der Investitionskosten zwischen dezentralem Anlagenkonzept und dem Virtual Central Konzept

Mehr als die Hälfte der Systemkosten hängen mit den Wechselrichtern zusammen. Die Wechselrichter im Virtual Central Konzept sind günstiger. Dies liegt unter anderem daran, dass die Kosten für den internen DC-Combiner entfallen. Dieser Vorteil wird durch die Notwendigkeit einer externen DC-Combiner-Box und den damit verbundenen Kosten aufgehoben, es kommt zu einem leichten Kostennachteil beim Virtual Central Konzept. Der größte Teil der Kostenunterschiede hängt jedoch mit den unterschiedlichen Verkabelungskosten und Spannungsebenen zusammen. Im Virtual Central Konzept werden zweiadrigte Kabel verwendet, die einzelnen Kabel weisen hierbei eine höhere Spannung von bis zu 1500 VDC bei niedrigeren Querschnitten auf. Im dezentralen Anlagenkonzept werden dreiadrigte Kabel mit PE-Leiter benötigt, die anliegende Spannung beträgt typischerweise 800 VAC.

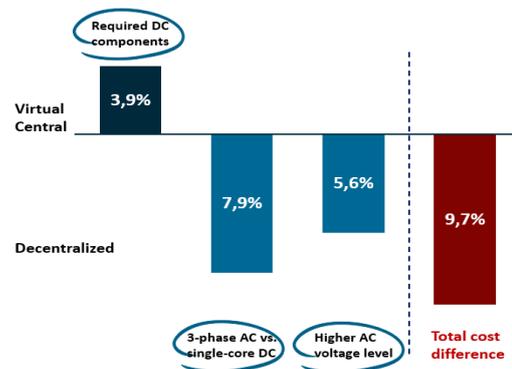


Fig.5: CAPEX Unterschiede

Unterschiede bei den Investitionskosten

DC-Seitige Unterschiede

Wechselrichter

Die Leistungsdichte sowie die Anzahl der DC-Eingänge stellen den Hauptunterschied der Wechselrichterkosten dar.

DC-Combiner-Box

Die Bündelung der String-Verkabelung zu einem einzigen Anschlusskabel findet nur bei dem Virtual Central Konzept statt.

Die DC-Combiner-Box befindet sich am Ende eines Modulstrings und ist am Montagegestell montiert, so dass keine zusätzlichen Montagesysteme notwendig sind. Sollte eine separate Anordnung der DC-Combiner-Boxen notwendig sein, kann dies ebenso realisiert werden. Des Weiteren existieren moderne Verkabelungsmöglichkeiten, die den Einsatz von DC-Combinern überflüssig machen können. Hier können PV-Strings direkt in ein DC-Kabel eingeführt werden. Die Investitionskosten des Virtual Central Konzepts können so noch weiter gesenkt werden.

Alternativ können die DC-Combiner-Boxen mit zahlreichen Überwachungsfunktionen wie beispielsweise String-Monitoring ausgestattet werden. Dies reduziert den Kostenvorteil, erweitert jedoch die Funktionalitäten.

Das Virtual Central Konzept erhöht die Erträge einer PV-Anlage. Ausschlaggebend ist hierfür eine Reihe von Faktoren: Zum einen verfügen Wechselrichter im Virtual Central Konzept über einen einzigen MPP-Tracker. Dies reduziert die Anzahl der Komponenten im Wechselrichter, was zu weniger Verlusten und höheren Wirkungsgraden führt. Weiterführend ist der DC-Generator gegenüber dem Wechselrichter oft überdimensioniert. Liegt die DC-Erzeugung über der AC-Ausgangsleistung des Wechselrichters geht ein Teil der Energie verloren. Während dieses als „Power-

Clipping“ bezeichneten Zustandes wird das MPP-Tracking eines Multi-MPPT-Wechselrichters nicht benötigt. In einem dezentralen Anlagenkonzept folgt nach einem Power-Clipping der Transport der Energie über weite Strecken bei 800 VAC zur Trafostation. Dies ist mit weiteren Verlusten verbunden. Beim Virtual Central Konzept tritt ein Power-Clipping erst wenige Meter neben der Trafostation auf, somit sind die Übertragungsverluste geringer. Auch die Übertragung an sich ist aufgrund der Systemspannung von bis zu 1500 VDC und der Verwendung von zweipoligen Kabeln effizienter.

Montage der Wechselrichter

Die Montage der Wechselrichter im Virtual Central Konzept ist im vorliegenden Beispiel um 3% höher. Dies liegt vor allem an der höheren Anzahl der Wechselrichter.

Verkabelung

String-Kabel

Die String-Kabel sind hauptsächlich abhängig von der Anzahl der PV-Module, der gewählten Spannung und deren Anschluss. Üblich sind XLPE-Kabel mit einem Kupferleiter und einem Querschnitt von 4 mm² bis 8 mm².

Verkabelung von der DC-Combiner-Box zum Wechselrichter

Hier liegt der Hauptunterschied des Virtual Central Konzeptes. Ein einziges, dickeres DC-Kabel ist nicht für ein dezentrales Anlagenkonzept einsetzbar, da die String-Kabel direkt am Wechselrichter angeschlossen werden. Dieses DC-Hauptkabel ist ein elementarer Bestandteil des Virtual Central Konzeptes.

Anstatt eines dreiphasigen Kabels mit PE-Leiter werden lediglich zwei DC-Kabel (plus und minus) benötigt. Darüber hinaus sinkt der benötigte Kabelquerschnitt aufgrund der höheren Systemspannung. Neben den elektrischen Parametern hängt das Design der DC-Kabel von den Bodenverhältnissen und dem thermischen Bodenwiderstand ab.

Der Querschnitt der PVC-ummantelten Aluminiumkabel (NAYY) hängt von der maximal zulässigen Stromtragfähigkeit ab. In unserem Beispiel ergibt sich daraus ein DC-Leiterquerschnitt von 150 mm².

Verkabelung vom Wechselrichter zum AC-Sammler

Ein dreiphasiges gebündeltes System mit PE-Leitern wird benötigt, um die Leistung mit 800 V AC zum AC-Sammler zu bringen. Für diese längeren Übertragungsstrecken werden PVC-isolierte Aluminiumkabel (NAYY) verwendet.

Durch die geringere Stromtragfähigkeit muss für die AC-Kabel ein dickerer Querschnitt verwendet werden. Der Leiterquerschnitt des DC-Kabels hat 150 mm², der des AC-Kabels beträgt 240 mm².

Die relative Stromtragfähigkeit nimmt mit zunehmendem Leiterquerschnitt ab. Allerdings sind die Tragfähigkeitswerte bei einadrigen Kabeln immer höher als bei gebündelten AC-Kabelsystemen.

Dies führt zu einem doppelten Nachteil der AC-Verkabelungskosten: Zum einen wird ein größerer Kabelquerschnitt benötigt, zum anderen sind AC-Kabel teurer als DC-Kabel.

Ein höherer Material- und Isolationsaufwand führt zu einem bis zu fünf Mal höheren Preis für die AC-Verkabelung der konventionellen dezentralen Lösung im Vergleich zur DC-Verkabelung im Virtual Central Konzept.

Verkabelung vom AC-Sammler zum Schaltschrank

Spezialkabel (NSGAFÖU) verbinden die Wechselrichter mit dem AC-Sammler und die AC-Sammler mit dem Schaltschrank. Die hochflexiblen, doppelt isolierten Kabel mit Kupferleitern und verschiedenen Kunststoff-Bestandteilen sind kostspielig, werden aber im Vergleich zum Gesamtsystem nur in geringen Mengen benötigt.

Hier ist ein leichter Kostenvorteil für das konventionelle dezentrale Anlagenkonzept erkennbar. Dies liegt vor allem an der höheren Nennleistung, welche durch die höhere AC-Spannung verursacht wird, weniger am Aufbau der PV-Anlage.

Kabelgraben

Die Hauptkabel sind direkt in den Boden eingegraben. Die Simulation basiert auf folgenden Umgebungsbedingungen:

Wärmewiderstand des Bodens	2.5K m/W
Umgebungstemperatur	30°C
Erdtemperatur	25°C
Nutzungsgrad	0.7

Abb.6: Umweltbedingungen

Durch die etwas geringere Anzahl an Wechselrichtern ist die Gesamtlänge der Kabelgräben bei der dezentralen Lösung um etwa 10% geringer. Die Verlegung von Drehstromkabeln ist jedoch kostenintensiver. Dies führt zu einem Kostennachteil beim dezentralen Anlagenkonzept.

AC-Seite

AC -Sammelbox

Die geringere Anzahl angeschlossener dezentraler Wechselrichter deutet auf geringere Kosten beim dezentralen Anlagenkonzept hin. Die höhere Spannung macht diesen Kostenvorteil jedoch zu einem leichten Kostennachteil.

AC-Schaltzschrank

Die Kosten für den AC-Schaltzschrank werden durch die Art des Schutzes der AC-Kabel gegen Fehlströme, die Anzahl der Verbindungen, den Nennwechselstrom und hauptsächlich durch die Spannungsebene bestimmt. Die 800 VAC des dezentralen Konzepts haben erhebliche Kostenauswirkungen. Solche Komponenten sind jedoch kein Industriestandard. Falls Ersatzteile benötigt werden, wird der lokale Händler diese höchstwahrscheinlich nicht auf Lager haben.

Auswirkungen des DC/AC-Verhältnisses

Dieser Abschnitt widmet sich der Frage, inwieweit sich ein höheres DC/AC-Verhältnis auf die Preisgestaltung auswirkt. Die obige Differenz bei den Investitionskosten (Abb. 5) basiert auf einem DC/AC-Verhältnis #1 wie in der folgenden Tabelle:

	Dezentraler Inverter	Virtual Central Inverter
Installierte AC-Nennleistung	6290kVA	6270kVA
Installierte DC-Nennleistung	6365kWp	6447kWp
DC/AC Verhältnis #1	101.2%	102.8%
Zusätzliche DC-Leistung	1196kWp	1290kWp
DC/AC Verhältnis #2	120.2%	123.4%

Abb.7: DC/AC-Verhältnis

Ein Anstieg von rund 20% führt zu einem DC/AC Verhältnis #2. Der Hauptunterschied für die Erhöhung des DC-Anteils des DC/AC-Verhältnisses hängt mit den zusätzlich installierten PV-Modulen zusammen, was zu einer Anpassung der AC- und DC-Verkabelung führt (modifizierte Anordnung und höhere Gleichstrombelastbarkeit).

Zum einen erhöht sich die Kabellänge je nach Konzept, was die Kabelkosten und die Kosten für den Kabelgraben in die Höhe treibt. Zum anderen sorgt die Erhöhung der DC-Generatorleistung für einen höheren DC-Gleichstrom. Dadurch steigt der erforderliche Leiterquerschnitt im Durchschnitt um bis zu 20%. Die Erhöhung der Generatorleistung hat jedoch keinen Einfluss auf den Querschnitt des AC-Kabels, da der maximale Wechselrichter-Ausgangsstrom der bestimmende Faktor für den unveränderten AC-Kabelquerschnitt ist.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Faktoren beträgt die durch die zusätzliche Generatorleistung "gewonnene" Kostensteigerung 1,7% für das dezentrale Konzept und 2,7% für das Virtual Central Konzept. Mit anderen Worten, das Delta ist ein Vorteil von 1% für das dezentrale Anlagenkonzept. Der Kostenvorteil der

Virtual Central Anordnung reduziert sich auf 9%.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Virtual Central Konzept auch für Anlagen mit einem DC/AC-Verhältnis von 120% bis 150% die kostengünstigere Lösung bleibt.

Interaktion mit Hochleistungsmodulen

PV-Module mit höheren Nennleistungen werden immer mehr zum Standard. Dementsprechend steigt der Gleichstrom im String.

Typischerweise werden zwei Strings an einen MPPT-Eingang eines dezentralen Wechselrichters angeschlossen. Beispielsweise beträgt der oben beschriebene maximale Gleichstrom für den Wechselrichter 26 A. Sind die Wechselrichter-DC-Eingänge voll ausgelastet, ist ein maximaler Strom pro String von nur 13 A möglich. Sollen Hochleistungsmodule (500+ Wp) mit Gleichstromleistungen von >13 A installiert werden, kann nur einer der beiden DC-Wechselrichtereingänge genutzt werden.

Dadurch können weniger PV-Module an den Wechselrichter angeschlossen werden. Die entsprechende Leistung erfordert, dass mehr Wechselrichter installiert werden.

Nehmen wir als Beispiel ein PV-Modul mit 17,5 A Gleichstrom, welches 9 MPPT-Eingänge mit insgesamt 157,5 A belegt. Der Wechselrichter in der Virtual Central Anwendung hat einen maximalen DC-Eingangsstrom von 183 A, so dass 10 Strings über die DC-Combiner-Box an den Wechselrichter angeschlossen werden können.

Außerdem sind die Ströme der bifazialen Module aufgrund der Bestrahlung der Rückseite höher.

Wechselrichter mit einem MPPT stellen somit nach wie vor die fortschrittlichste Lösung für solche Anwendungsfälle dar. Sie ermöglichen den grenzenlosen Einsatz von Hochleistungsmodulen oder bifazialen Modulen.

Ausblick

Der vorliegende Artikel legt dar, dass ca. 10% der Kosten für die elektrische Infrastruktur einer großen PV-Anlage gespart werden können, wenn ein Virtual Central Konzept auf Basis von String-Wechselrichtern verwendet wird.

Neben der Reduzierung der Investitionskosten stellt sich die Frage mit welchem Konzept höhere Erträge und somit höhere Einnahmen erzielt werden können.

Vorläufige Ertragsberechnungen zeigen, dass beim Virtual Central Konzept mehr Energie ins Stromnetz eingespeist werden kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies zu höheren Einnahmen des Betreibers führt.

Weitere Details werden in einem separaten Whitepaper behandelt. In diesem wird insbesondere auf die Erträge von dezentralen Wechselrichtern mit mehreren MPPT und Wechselrichtern mit einem MPPT eingegangen.

Neckarsulm, 07.10.2021.

Der Text und die Abbildungen geben den aktuellen Stand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wieder und wurden aus dem Englischen übersetzt. Im Zweifelsfall gilt der englische Originaltext. Änderungen und Irrtümer vorbehalten.