



ANFORDERUNGEN AN DIE BEREITSTELLUNG VON EMT- SIMULATIONSMODELLEN

Harmonisierte EMT-Modellanforderungen für HGÜ und Statcom

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Anforderungen an die Modell- und Datenbereitstellung.....	4
2.1	Allgemeines.....	4
2.2	Toolunabhängige Daten und Modellbereitstellung.....	5
2.2.1	Leistungsteil.....	5
2.2.2	Regelungshardware.....	5
2.2.3	Regelungssoftware.....	6
2.2.4	Software – Schnittstellen.....	7
2.3	Toolabhängige Daten und Modellbereitstellung.....	8
3	Angaben zum Modellumfang und zum Detailgrad der Modellierung.....	9
3.1	Grundsätzliche Anforderungen.....	9
3.2	Vereinfachte EMT-Modelle.....	11

1 Einleitung

Das Verhalten einer leistungselektronischen Anlage an einem Netzanschlusspunkt wird größtenteils durch Simulation geprüft, wobei unterschiedliche Software-Tools zum Einsatz kommen. Da die Regelung einen großen Einfluss auf das Anlagenverhalten hat, wird eine realitätsnahe Nachbildung der Anlage und eine ausreichende Qualität der Simulationsergebnisse nur sichergestellt, wenn die originale Regelungssoftware in die verwendete Simulationsumgebung eingebunden wird. Weiterhin muss in Verbindung mit einer angemessenen Beschreibung des Leistungsteils, auch eine Unabhängigkeit von einer spezifischen Simulationsumgebung umgesetzt sein. Eine „Modellierung“ der Regelungssoftware in einer spezifischen Simulationsumgebung birgt das Risiko von Modellierungsfehlern, proprietären Modellkomponenten, unzulässigen Vereinfachungen usw. und ist nicht zulässig.

Jede leistungselektronische Anlage besteht aus Komponenten, die für eine Simulation in die folgenden drei Gruppen unterteilt werden können:

- **Leistungsteil:**
Der Leistungsteil besteht aus elektrischen, magnetischen und mechanischen Komponenten wie z.B. Transformatoren, Stromrichter-Hardware (u.a. Halbleiter, Filter, Sensoren / Wandler), Schaltanlagen.
- **Regelungshardware:**
Unter dem Begriff „Regelungshardware“ wird jegliche Hardware zusammengefasst, die nicht im Leistungsteil liegt und z.B. für die Steuerung, die Regelung oder den Schutz der Anlage verwendet wird. Dies können digitale Systeme wie z.B. Industrie-PCs oder Elektronikaufbauten mit Mikroprozessoren, digitalen Signalprozessoren oder FPGA sein. In diese Gruppe fallen zudem auch analoge Steuerungen.
- **Regelungssoftware:**
In die Gruppe „Regelungssoftware“ fällt im Wesentlichen die Software, die auf der jeweils zugehörigen Regelungshardware ausgeführt wird und die erwünschte Funktion der Regelung realisiert. Dies betrifft z.B. die Software zur Regelung der Stromrichter oder die Software zur Generierung der Pulse für die geschalteten Halbleiterventile. Inbegriffen ist zudem Steuerungssoftware, Schutzsoftware sowie Software zur Nachbildung der Funktion von Steuerungsteilen, die an der Anlage ohne Software gesteuert werden (z.B. analoge Schutzsysteme, deren Funktion in der Simulation mit einer Steuerungssoftware nachgebildet wird).

Die Gesamtregelung kann dabei eine beliebige Struktur aufweisen, bei der verschiedene Aufgaben mit verschiedenen Funktionsmodulen (z.B. auf Basis von DSP, FPGA) in unterschiedlichen Abtastzeiten ausgeführt werden (siehe Abbildung 1). Dabei können die Funktionsmodule untereinander sowie mit dem Leistungsteil beliebig verbunden sein. Die Ankopplung an den Leistungsteil erfolgt bspw. bei Messsignalen über analoge Wandler, dessen reale Eigenschaften wie Filtereigenschaften oder Verzögerungen einen Einfluss auf das Regelungsverhalten haben können. Für adäquate Simulationsmodelle muss die Gesamtregelung entsprechend ihrer Wirkung abgebildet werden.

Sofern keine abweichende Anforderung durch den AG genannt ist, gilt grundsätzlich, dass:

- die Modellierung der Regelungssysteme, die Einbindung der Regelungsalgorithmen und die Modellierung des Leistungsteils strikt voneinander zu trennen sind,
- für die Einbindung der Regelungsalgorithmen pro Funktionsmodul kompilierter Code verwendet wird und die entsprechenden Schnittstellen zwischen den Funktionsmodulen innerhalb des Regelungssystems oder dem Leistungsteil ausreichend dokumentiert sein müssen. (Hinweis: Abweichungen hiervon/Vereinfachungen sind nach Absprache mit dem AG möglich, siehe Abschnitt 2.2.3) und

- die Modellierung des Leistungsteils und der Regelungssysteme in der spezifizierten Simulationssoftware erfolgt. Durch die Modellierung des Regelungssystems ist sicherzustellen, dass der korrekte Aufruf der Regelungsalgorithmen in den geforderten Abtastzeiten realisiert wird. Die Abtastzeit kann variabel sein und hängt von den verwendeten Regelungsalgorithmen ab (z.B. bei frequenzsynchrone Abtastung).

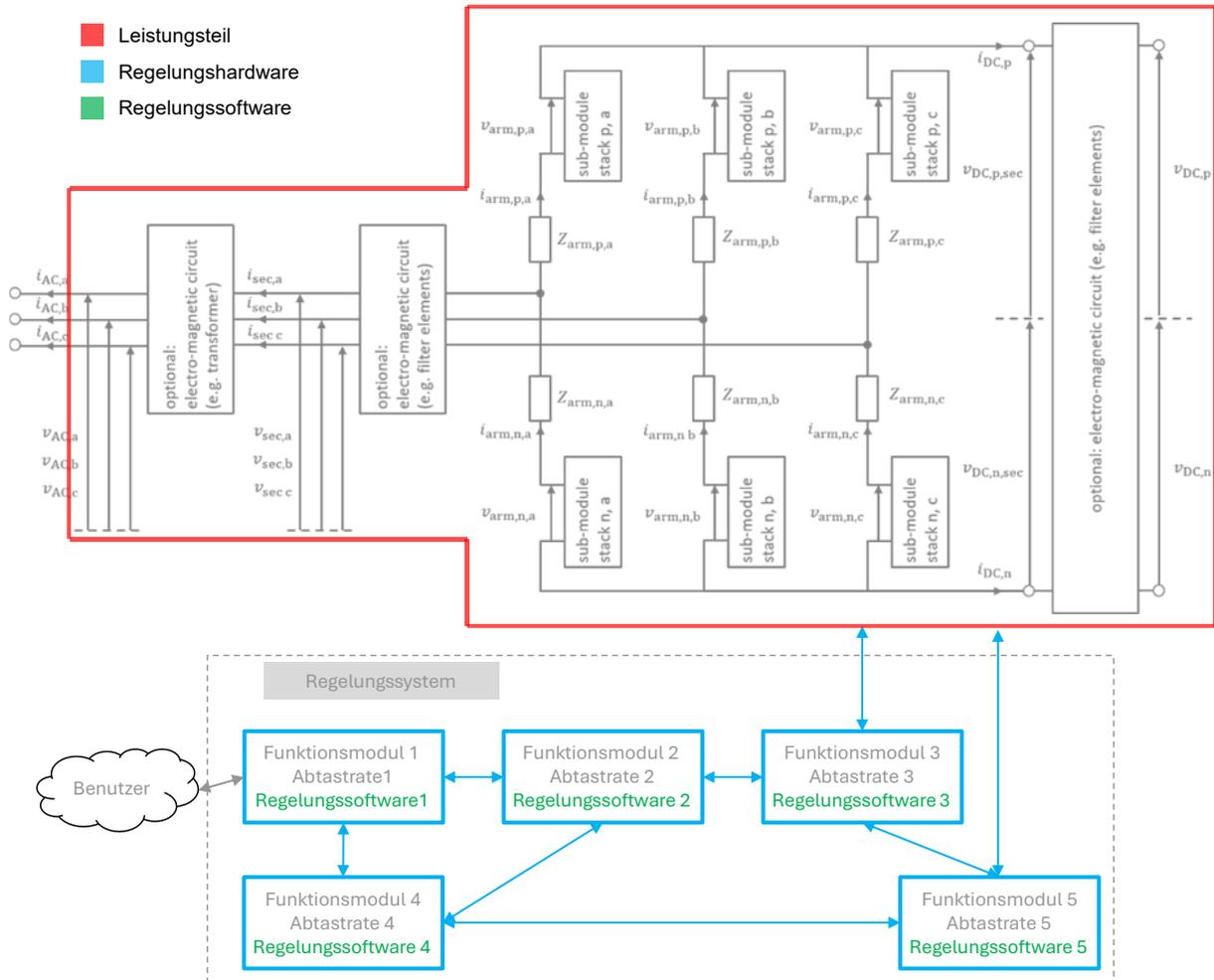


Abbildung 1: Beispielhaftes Regelungssystem bestehend aus fünf Funktionsmodulen mit unterschiedlichen Abtastraten

2 Anforderungen an die Modell- und Datenbereitstellung

2.1 Allgemeines

Die durch den AN zu liefernden Modelle und der notwendige Detaillierungsgrad hängen von dem zu untersuchenden Phänomen und der jeweiligen Fragestellung ab. Grundsätzlich müssen Modelle bereitgestellt werden, die das Verhalten der Anlage bei stationären, dynamischen (RMS) und transienten Vorgängen (EMT) einschließlich Oberschwingungen und Zwischenharmonischen widerspiegeln.

Insbesondere sind auch diejenigen Modelle, die den durch den AN durchgeführten Studien im Rahmen der „Design und Engineering“ Phase zu Grunde gelegt wurden, bereitzustellen, sodass die Ergebnisse aus diesen Studien nachvollziehbar und reproduzierbar sind.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Daten- und Modellbereitstellung entsprechend der zuvor genannten Einteilung (Leistungsteil, Regelungshardware, Regelungsalgorithmen) genauer beschrieben.

2.2 Toolunabhängige Daten und Modellbereitstellung

2.2.1 Leistungsteil

Für den Leistungsteil ist die Abgabe eines Ersatzschaltbildes mit allen Leistungsteilkomponenten, den zugehörigen Parametern (bei Bedarf mit Prüfprotokollen und Datenblättern) sowie allen Messstellen und Aktoren (Schaltern) gefordert. Das Ersatzschaltbild und die Dokumente müssen sämtliche für die Funktionalität der Anlage relevanten Komponenten enthalten. Die Ersatzschaltbilder und Parameter müssen für den durch den AG spezifizierten Frequenzbereich gültig sein.

Hierzu gehören z.B.:

- Transformatoren
- Filter
- Ableiter
- Stromrichter (Induktivitäten, Kapazitäten, Halbleitereigenschaften)
- Ggf. Bremssteller
- Sternpunktbehandlung
- Erdungswiderstände
- Anschlussleitungen (Freileitungen, Kabelsysteme)
- Schalter (AC- und DC-seitig)

Weitere Details siehe Abschnitt 3.

2.2.2 Regelungshardware

Die Regelungshardware erfasst im Wesentlichen die Messgrößen, führt die zugehörige Regelungssoftware aus und gibt die zugehörigen Ausgangsgrößen aus. In Abhängigkeit der Abtastzeiten wird dieser Ablauf zyklisch wiederholt. Zur Nachbildung dieses Verhaltens in der Simulation müssen die folgenden Daten je Funktionsmodul (z.B. CPU, DSP) der Regelungshardware angegeben werden:

- Zuweisung der Eingangsgrößen: es muss eine tabellarische Auflistung der Eingangsgrößen der Regelungshardware gegeben sein. Eingangsgrößen sind z.B. die Messstellen des Leistungsteils oder die Ausgangsgrößen weiterer Funktionsmodule der Regelungshardware.
- Zuweisung der Ausgangsgrößen: analog zu den Eingangsgrößen muss eine tabellarische Auflistung der Ausgangsgrößen vorliegen, um diese z.B. den Eingängen anderer Regelungshardware oder den Aktoren des Leistungsteils zuordnen zu können.
- Zuweisung der auszuführenden Regelungssoftware: jedes Funktionsmodul der Regelungshardware führt genau eine Regelungssoftware aus. Daher muss zu jeder Regelungshardware die zugehörige Regelungssoftware einschließlich der Abtastrate/der

Abtastzeit bekannt sein. Weiterhin sind die Schnittstellen zur weiterer Regelungshardware und zugehörige Kommunikationszeiten anzugeben.

2.2.3 Regelungssoftware

Die Regelungssoftware darf ausschließlich die Regelungsalgorithmen (keine elektrischen Komponenten!) in Form einer oder mehrerer dynamischer Bibliotheken (bspw. DLL-Dateien für Windows-basierte Systeme) mit den definierten Schnittstellen enthalten. Die Regelungssoftware ist pro physikalischem Regelungssystem/Funktionsmodul in Form einer kompilierten Bibliothek bereitzustellen. Dabei ist eine 32-bit und eine 64-bit-Version zu erstellen.

Falls der AG nichts anderes fordert, sind defaultmäßig kompilierte Bibliotheken für windowsbasierte Systeme (d.h. DLLs) abzugeben.

Besteht die gesamte Anlagensteuerung bzw. die Regelung aus mehreren Regelungssystemen, sind die kompilierten Bibliotheken mit eindeutigem Namen für jedes Regelungssystem abzugeben. Die Verwendung mehrerer Bibliotheken innerhalb eines physikalischen Regelungssystems, die aufeinander zugreifen, ist nicht zulässig. Die Verwendung von Interpolationsalgorithmen innerhalb der Bibliotheken, welche auf den Simulationszeitschritt und den Solver in spezifischen Simulationsumgebungen abgestimmt sind, ist ebenfalls nicht zulässig.

Die Regelungssoftware (Regelungsalgorithmen) liegt in vielen Fällen aufgrund der verwendeten Entwicklungsumgebung bereits als C-Code vor oder kann aus der Eingabe in einem Blockschaltbild als C-Code generiert werden und z.B. in kompilierter Form auf einem Industrie-PC zur Regelung der Anlage verwendet werden. In diesem Fall ist der originale C-Code direkt zur Erzeugung der kompilierten Bibliothek zu verwenden. Eine Vereinfachung ist nicht zulässig.

Ein Teil der Anlagensteuerung ist häufig nicht in C-Code umgesetzt, z.B. eine Pulsmustergenerierung, welche in einem FPGA ausgeführt wird. In diesem Fall muss die jeweilige Funktionalität in C-Code umgesetzt und ebenfalls als kompilierte Bibliothek mit der spezifizierten Schnittstelle erzeugt werden.

Erweiterungen der Regelungsfunktionen im Vergleich zur realen Anlage sind nicht zulässig. Dies betrifft insbesondere die Umsetzung von FPGA im Regelungssystem, die z.B. eine Filterung der Messgrößen enthalten können.

Hinweise:

- Falls die Anzahl der Regelungssysteme sehr hoch ist (z.B. >10), kann in Absprache mit dem AG eine abweichende Unterteilung der Regelungssoftware in einzelne Bibliotheken erfolgen oder einige Bibliotheken können zusammengefasst werden. Die Unterteilung muss sich an die Regelungsebenen der realen Anlage anlehnen, z.B. Pulsmustergenerierung separiert von der stromrichternahen Regelung sowie separiert von der überlagerten Regelung, usw.
- Dabei ist zwischen AG und AN insbesondere abzustimmen:
 1. Welche Signale als beobachtbare Ausgänge aus der Bibliothek herausgeführt werden müssen.
 2. Welche funktionalen Regelungsteile (z.B. POD oder Active Filtering) müssen innerhalb der Bibliotheken aktivierbar/deaktivierbar sein müssen.

Der AN muss folgende Dokumente bereitstellen:

- Ersatzschaltbild und Parameter für Leistungsteil
- Regelungssoftware je Regelungssystem als kompilierte Bibliothek einschließlich umfassender Dokumente der verwendeten Schnittstellendefinition
- Dokumentation der Abstraten und Aufrufreihenfolge der einzelnen kompilierten Bibliotheken

Die Bereitstellung der Daten (Ersatzschaltbilder, Parameter für Leistungsteil, Angaben zum Regelungssystem usw.), sowie durch die Bereitstellung der Regelungssoftware in Form von kompilierten Bibliotheken einschließlich der dazugehörigen Dokumentation der Schnittstellen muss der AG grundsätzlich in die Lage versetzt werden, selbstständig ein Modell der leistungselektronischen Anlage in einer beliebigen Simulationssoftware unter Verwendung unterschiedlicher Software – Schnittstellen zu implementieren. Alle hierfür benötigten Informationen sind durch den AN in einem maschinenlesbaren Format (z.B. Excel) bereitzustellen.

Durch das beschriebene Vorgehen erfolgt die Datenbereitstellung für die Simulation der leistungselektronischen Anlage toolunabhängig.

2.2.4 Software – Schnittstellen

Der AG spezifiziert die Software-Schnittstelle für die kompilierten Bibliotheken der Regelungssoftware. Hier werden die Anforderungen an die Schnittstellen und Funktionen in Form eines C-Code Headers vorgegeben.

Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung werden in jeder Software-Schnittstelle Strukturen bestehend aus Datenvektoren und/oder Datenarrays definiert, die an die einzelnen Funktionen übergeben oder von diesen zurückgegeben werden, um den Datenaustausch zwischen den Regelungsalgorithmen und dem Netzberechnungsprogramm standardisiert zu ermöglichen. Neben diesen Strukturen werden auch die relevanten Funktionen definiert, welche für die Simulation benötigt werden. Hierzu zählen z.B.:

- Initialisierungsfunktion
- Berechnungsfunktion, welche zyklisch während der Simulation aufgerufen wird
Hinweis: Der Aufruf der Berechnungsfunktion muss dem Regelungszyklus der realen Regelungshardware entsprechen und ist ggf. nicht konstant (z.B. bei fester Abtastrate pro Netzperiode und variabler Netzfrequenz). Die Steuerung des Aufrufs muss durch die verwendete Simulationsumgebung erfolgen. Die Simulationsschrittweite muss flexibel durch den Anwender einstellbar sein.
- Abschlussfunktion, welche die Aufgabe hat, den Speicherplatz, der in der kompilierten Bibliothek allokiert wurde, wieder freizugeben.
- Rücksetzungsfunktion, welche die Regelungssoftware wieder in den Zustand nach der Initialisierung überführt
- Snapshot-Funktion, welche die internen (Zustands)-größen der Regelung der Softwareumgebung zur Verfügung stellt und somit eine Snapshot-Bildung ermöglicht
- ggf. weitere

Es gibt verschiedene verfügbare und bekannte Software - Schnittstellen, welche sich zwar in Details unterscheiden, aber grundsätzlich geeignet sind, die kompilierten Bibliotheken in unterschiedliche Simulationsumgebung einzubinden:

- **IEEE/CIGRE Modelling Method**
[Referenz: IEEE-CIGRE B4-82 - Use of real code in EMT Models for Power System Analysis]
- **ENTSO – E standardized Control Interface for HVDC SIL/HIL**
[Referenz: <https://www.entsoe.eu/2020/04/24/entso-e-standardized-control-interface-for-hvdc-sil-hil-conformity-tests/>]
- **IEC 61400-27-2:2022-08, Annex G**
[Referenz: DIN EN IEC 61400-27-2 (VDE 0127-27-2):2022-08, Anhang G]

Falls der AG nichts anderes fordert, ist defaultmäßig der **IEEE/CIGRE** Standard durch den AN für die zu kompilierenden Bibliotheken der einzelnen Regelungssysteme zu verwenden.

Unabhängig von der Wahl der oben genannten Software-Schnittstellen ist Folgendes zwingend zu berücksichtigen:

- In dem zurückgegebenen Datenvektor der Berechnungsfunktion der kompilierten Bibliothek muss die Aufrufzeit enthalten sein, welchen den Zeitpunkt oder die Dauer bis zum nächsten Aufruf der Berechnungsfunktion vorgibt und variabel sein kann.
- Eine Mehrfachinstanzierung der kompilierten Bibliotheken in der Simulationsumgebung muss möglich sein.
- Unterschiedliche kompilierte Bibliotheken dürfen sich keinen Speicherbereich teilen. Je nach Definition können interne Speicher notwendig sein, um Werte der Regelung (Zustände) persistent zu speichern, so dass diese bei der nächsten Berechnung der Regelung wiederverwendet werden können. Dazu dürfen in der kompilierten Bibliothek Speicherbereiche reserviert und bei den Berechnungen verwendet werden. Diese Speicherbereiche müssen explizit den einzelnen Bibliotheken zugeordnet sein. Ein gemeinsamer Zugriff auf den Speicherbereich durch mehrere Bibliotheken oder Instanzen ist nicht zulässig. Die Übertragung von Signalen zwischen unterschiedlichen kompilierten Bibliotheken ist nur über die definierte Schnittstelle zulässig.
- Zum Speichern und Laden eines Zustands der Regelung ist eine Snapshot-Funktionalität gefordert. Durch diese Funktionen wird eine Simulation verschiedener Ereignisse ausgehend von einem definierten Startpunkt (definierter Arbeitspunkt bei definiertem Netzzustand) ermöglicht. Dazu müssen die internen (Zustands)-größen der Regelung der Softwareumgebung über die Software-Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Zur Wahrung der IP des AN ist eine Verschlüsselung der internen Zustandsgrößen der Regelung zulässig.

Es sind regelmäßige Updates der zu liefernden Regelungssoftware (kompilierte Bibliotheken) gemäß dem Entwicklungsstand des Engineerings zu liefern. Final sind die kompilierten Bibliotheken mit dem Regelungscode zu liefern, welcher auf der Anlage implementiert ist. Außerdem muss sichergestellt sein, dass die kompilierten Bibliotheken für die gesamte Lebensdauer der Anlage in entsprechende Simulationsumgebungen eingebunden werden können. Eine technische Zeitbegrenzung der Bibliotheken ist somit nicht zulässig.

2.3 Toolabhängige Daten und Modellbereitstellung

Für die toolabhängige Daten- und Modellbereitstellung sind die Anforderungen aus Abschnitt 2.2 ebenfalls einzuhalten. Die Bereitstellung des toolabhängigen Modells erfolgt in einer durch den AG spezifizierten Simulationsumgebung (z.B. PSCAD, PowerFactory, o.ä.). Hierbei

- ist der Leistungsteil entsprechend der zugehörigen Datenblätter / Prüfprotokolle in der spezifizierten Simulationsumgebung zu modellieren;
- sind die Regelungsalgorithmen in Form kompilierter Bibliotheken entsprechend der spezifizierten Software-Schnittstelle mittels toolspezifischen Wrappern in das spezifizierte Simulationstool einzubinden;
- ist durch das Simulationstool / den Wrapper sicherzustellen, dass die Aufrufe der Regelungsalgorithmen entsprechend der tatsächlichen Abstraten der Regelungssysteme erfolgt und;
- ist die Ankopplung der Bibliotheken und der Wrapper einsehbar zu gestalten (keine Vorkompilierung);
- In der offenen Verschaltung sind keine Elemente zu verwenden, die an der Anlage in der Regelungssoftware liegen.

Der AG kann eine Vorlage eines tool-abhängigen EMT-Modells (Template) bereitstellen, in welche die kompilierten Bibliotheken integriert werden müssen. Wird keine Vorlage bereitgestellt oder eine

Simulationsumgebung explizit spezifiziert, sind die EMT-Modelle in PSCAD/EMTDC zu liefern. Die einzusetzende PSCAD-Version muss dabei mindestens V4.6.3 und V5 umfassen. Die toolabhängigen Teile des Modells müssen mit Intel Fortran Compiler XE 15 und mit Intel Fortran Compiler 19 rechenbar sein. Sofern der AN intern andere Intel Fortran Compiler Versionen verwendet, muss ein Abgleich von Simulationsergebnissen mit der gelieferten Compilerversion durchgeführt und dem AG zur Verfügung gestellt werden. Das toolabhängige Modell muss mit Visual Studio Version 2012, 2015 und 2022 lauffähig sein. Sollten für Fortran Compiler, Visual Studio oder PSCAD andere Versionen aus Sicht des AG oder des AN vorteilhaft sein oder im Projektablauf notwendig werden, so kann dies in Absprache mit dem AG angepasst werden.

3 Angaben zum Modellumfang und zum Detailgrad der Modellierung

3.1 Grundsätzliche Anforderungen

Wie in Abschnitt 2 beschrieben hängt der notwendige Modellumfang und der notwendige Detailgrad der Modellierung von der zu untersuchenden Dynamik und der jeweiligen Fragestellung ab. Der AN hat dem AG ein (detailliertes) EMT-Modell sowie ein vereinfachtes EMT-Modell bereitzustellen. Im Folgenden werden diesbezüglich die wesentlichen Mindestanforderungen aufgeführt.

Leistungsteil allgemein:

- In dem Modell muss das detaillierte Stromrichterdesign berücksichtigt werden. Hierzu zählen u.a.
 - Anzahl und elektrische Parameter der Submodule und Armdrosseln
 - Alle Komponenten der Stromrichterstationen (Transformatoren, Filter, Überspannungsableiter)
 - Leistungsschalter
 - Sternpunktbehandlung
- Sofern mehrere parallele Umrichter vorgesehen sind, muss das EMT-Modell zwingend die parallelgeschalteten Umrichter sowie die reale Pulsmustergenerierung aller Umrichter-Einheiten beinhalten.
- Sofern die leistungselektronische Anlage über Kabelstrecken angebunden ist (auf HöS oder MS-Seite), ist das frequenzabhängige Übertragungsverhalten der Kabelsysteme mittels geeigneter EMT-Modelle entsprechend des spezifizierten Frequenzbereiches nachzubilden und vom AN in geeigneter Form nachzuweisen.
- Ebenso ist das frequenzabhängige Übertragungsverhalten des HöS/MS-Transformators entsprechend des spezifizierten Frequenzbereichs nachzubilden. Eine adäquate Modellierung des Übertragungsverhaltens der Transformatoren ist vom AN durch einen Abgleich mit Messdaten nachzuweisen. Zusätzlich sind die Sättigungseigenschaften der Transformatoren geeignet nachzubilden und mittels Messdaten abzugleichen
- **Frequenzbereich:** Das Modell muss in einem Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 2500 Hz gültig sein. Zusätzlich müssen die EMT-Modelle zur Analyse von langsam veränderlichen Überspannungen für einen erweiterten Frequenzbereich 0 – 20 kHz tauglich sein. Etwaige Modellierungseinschränkungen, die aufgrund des erweiterten Frequenzbereiches auftreten können, sind vom AN zu dokumentieren.

Leistungsteil Stromrichter

- Das EMT-Modell muss die Ströme und Spannungen der Submodule, Schaltenergien der Halbleiter, d.h. inkl. den nichtlinearen Eigenschaften etc. wiedergeben. Die Sperrzeiten zwischen dem Ein- und Aus-Status der IGBTs müssen modelliert werden.

- Das EMT-Modell muss auch die Sperrschichttemperatur-abhängigen Halbleitereigenschaften wie On-State-Spannungen, Schaltverluste und Erholungsverluste beachten.
- Die Anzahl der aktiven Module (Funktions- und Submodule) muss für den Anwender im Bereich der minimal notwendigen und maximal zur Verfügung stehenden (Redundanz) einstellbar sein.
- Das EMT-Modell muss den realen Zustand der Anlage in Bezug auf die Submodule, Betriebsmittel, parasitäre Elemente etc. wiedergeben.

Regelung und Schutz der leistungselektronischen Anlage

- Es müssen alle Details der Stromrichterregelung (z.B. innere und äußere Regelkreise) und der Ansteuerung der Leistungselektronik und des Stromrichterschutzes enthalten sein
- Alle Regelungs- und Schutzsysteme (Messerfassung, übergeordnete Regelung, Stromrichter-nahe Regelung, Ansteuerung der Leistungselektronik, Schutzfunktionen) müssen im EMT-Modell enthalten sein und in der beiliegenden Dokumentation detailliert beschrieben werden.
- Alle wesentlichen Regelungs- und Schutzfunktionen, zumindest aber die Funktionen, die für die Konformitätsnachweise der elektrischen Eigenschaften gemäß VDE-AR-N 4131 notwendig sind, müssen Bestandteil des EMT-Modells sowie ein-/aus-schaltbar und parametrierbar sein.
- Das EMT-Modell muss das reale Regelungsverhalten und ein realistisches Verhalten in Bezug auf Messungen, Tot- und Signallaufzeiten, Verriegelungszeiten etc. wiedergeben. Dies muss dokumentiert sein.
- Das EMT-Modell muss alle erforderlichen Funktionen enthalten, die in dem für dieses Modell angegebenen Frequenzbereich aktiv/wirksam sind.
- Das EMT-Modell muss das reale Start- und Abschaltverhalten der Regelung und des Stromrichters nachbilden.
- Zusätzliche Stabilitäts- und Modulationsfunktionen, z.B. AC-Spannungsregelung, Frequenzregelung, Regelung der Leistungsschwingungsdämpfung (POD) und EPC-Funktion (falls zutreffend), müssen vollständig zugänglich und parametrierbar sein.
- Das EMT-Modell muss eine ausreichend detaillierte Nachbildung der relevanten Schutzfunktionen unter Berücksichtigung von Verzögerungszeiten im Mess-, Signalverarbeitungs- und Kommunikationssystem sowie dem nichtlinearen Verhalten von Messwandlern enthalten. Insbesondere müssen alle Schutzfunktionen, die zum unmittelbaren Schutz der Stromrichter-Einheiten notwendig sind, implementiert werden. Diese sind vollständig inklusive ihrer Auslösewerte anzugeben und zu beschreiben. Hierzu gilt mindestens:
 - a. Für den Zeitbereich relevante, eingebaute Schaltsequenzen
 - b. Relevante Fehlerstellen müssen bereits implementiert sein und vom Benutzer auswählbar sein. Zusätzliche zu untersuchende Fehlerstellen können während des Projektverlaufes vom AG festgelegt werden und müssen im EMT-Modell nachträglich integriert werden
 - c. Die folgenden Schutzparameter müssen mindestens enthalten und falls zutreffend einstellbar sein:
 - Unterspannung und Überspannung
 - Frequenz
 - Überstrom
 - di/dt
 - Oberschwingungen
 - Strom- oder Spannungsungleichgewichte

Verwendungszweck

- Das EMT-Modell muss in der Lage sein, die im Rahmen des Prozesses zur Einhaltung der Netzanschlussbedingungen geforderten Systemstudien durchzuführen.
- Das EMT-Modell muss die Nachvollziehbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Auslegungsstudien sicherstellen.
- Für HGÜ: Das EMT-Modell muss das Verhalten der Anlage bei Kurzschlüssen auf der Gleichstromleitung darstellen, einschließlich Schutzmaßnahmen, Neukonfiguration und automatischer Wiedereinschaltung (falls zutreffend).
- Die dynamischen Bibliotheken müssen – falls vom AG gefordert – auch auf echtzeitfähigen Systemen (vom AG zu definieren) lauffähig und für Hardware-in-the-Loop (HIL) Tests nutzbar sein.

Dokumentation und Bedienung

- Teile des EMT-Modells, welche die Regelungen auf Netz- und Stationsebene repräsentieren, müssen offengelegt werden. Werden diese aus unumgänglichen Gründen verschlüsselt, sind alternativ dazu Blockdiagramme vorzulegen, welche die Regelungen einschließlich der verwendeten Parameter vollständig beschreiben
- Stromrichternahe Regelungen sind zu beschreiben, und es sind Blockdiagramme bereitzustellen, welche die wesentlichen Eigenschaften und Verknüpfungen beschreiben.
- Die in der Realität vom AG einstellbaren Parameter müssen auch in dem Modell zugänglich und einstellbar sein.
- Die Simulationsschrittweite des EMT-Modells muss flexibel durch den Anwender einstellbar sein.
- Im EMT-Modell muss für den Benutzer erkenntlich sein, welche Schutzfunktionen, einschließlich der genauen Kennzeichnung / Nummer, ausgelöst haben.

3.2 Vereinfachte EMT-Modelle

Für die Nachbildung der leistungselektronischen Anlage im toolabhängigen Format ist neben dem detaillierten EMT-Modell auch ein vereinfachtes und eventuell aggregiertes EMT-Modell zu liefern, welches einen Kompromiss zwischen Modellierungstiefe und Rechenaufwand darstellt.

Das detaillierte EMT-Modell der Anlage beinhaltet die vollständig nachgebildeten (eventuell parallelen) Stromrichter-Einheiten einschließlich realer Pulsmustergenerierung. Hierbei sind die in den zuvor genannten Abschnitten genannten Anforderungen einzuhalten. Das detaillierte EMT-Modell dient u.a. zum Benchmark mit dem vereinfachten EMT-Modell und den Echtzeitsimulations-Modellen sowie für detaillierte Design- und Interaktionsstudien.

Das vereinfachte EMT-Modell der Anlage kann aus einer vereinfachten Arm- bzw. Ventilmodellierung eines Stromrichters bestehen (bspw. Nachbildung der Stromrichter-Arme mittels Ersatzspannungsquellen) und berücksichtigt keine Pulsmustergenerierung. Hierbei wird durch die Regelung der gewünschte Aussteuergrad je Arm bestimmt und basierend auf dem Aussteuergrad und der momentanen Kapazitätsspannung die Armspannung in der Ersatzspannungsquelle eingestellt. Parallele Stromrichter können im Falle gleicher Hardware und gleicher Regelung aggregiert werden. Untersuchungsziele des vereinfachten EMT-Modells stellen vornehmlich ausgedehnte EMT-Systemstudien dar. Die Validierung des vereinfachten EMT-Modells geschieht durch einen Benchmark mit dem EMT-Modell.