

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aplikace výkonové elektroniky ve smart grid sítích

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vladimír JEŽEK**
Osobní číslo: **E16B0018P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Aplikace výkonové elektroniky ve smart grid sítích**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce se zabývá přehledem nových aplikací výkonové elektroniky v oblasti inteligentních sítích tzv. smart grids.

1. Uveďte přehled používaných polovodičových součástek výkonové elektroniky a moderní prvky na bázi SiC a GaN.
2. Popište koncepci smart grids a vazbu na obnovitelné zdroje, akumulaci energie, elektrická vozidla apod.
3. Uveďte přehled aplikací výkonové elektroniky ve smart grids sítích.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Power Electronics in Smart Grid and Renewable Energy Systems - Bimal K. Bose.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jakub Talla, Ph.D.

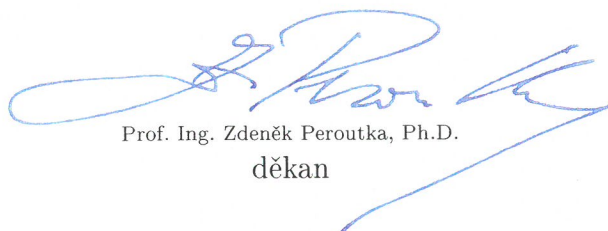
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce:

13. června 2019



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá přehledem aplikací výkonové elektroniky v oblasti inteligentních sítí, tzv. smart grids. Jsou zde stručně představeny polovodičové součástky využívané ve výkonové elektronice od nejjednodušších a nejdéle známých po ty nejmodernější. Druhá část této práce se zabývá konceptem chytré sítě, jejími nezbytnými prvky a důvody, které vedou k přechodu z konvenční sítě na chytrou síť. Ve třetí části jsou porovnány jednotlivé typy výkonových součástek z hlediska jimi dosahovaných parametrů a dále jsou zde uvedeny některé možnosti aplikace výkonové elektroniky.

Klíčová slova

Výkonová elektronika, SiC, GaN, obnovitelné zdroje, akumulace energie, inteligentní síť, chytrá síť, elektromobilita, polovodičové součástky

Abstract

This bachelor thesis deals with an overview of power electronics applications in the smart grids. There are introduced the most common semiconductor devices used in power electronics from the simplest and longest known ones to the most modern types. The second part of the thesis deals with the concept of smart grid, its necessary elements and reasons that lead to transition from a conventional grid system to smart grid system. In the third part there are compared the individual types of power components in terms of achieved parameters and also there are described some possibilities of power electronic application.

Key words

Power electronics, SiC, GaN, renewable resources, energy accumulation, smart grid, electromobility, semiconductor components

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 13.6.2019

Vladimír Ježek

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
1 POLOVODIČE VE VÝKONOVÉ ELEKTRONICE	9
1.1 HISTORIE POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK	10
1.2 PŘEHLED POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK	10
1.2.1 Výkonová dioda	10
1.2.2 Výkonový tranzistor	11
1.2.3 IGBT	11
1.2.4 MOSFET	12
1.2.5 Výkonové tyristory	12
1.2.6 GTO	13
1.2.7 IGCT	13
1.3 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY NA BÁZI SiC A GAN	14
1.3.2 SiC	14
1.3.3 GaN	15
2 SMART GRIDS	16
2.1 PRINCIP A ÚČEL CHYTRÝCH SÍTÍ	16
2.2 SMART GRIDS V EU A ČR	17
2.2.1 Česká technologická platforma Smart Grid	17
2.2.2 Projekt smart region ve Vrchlabí	18
2.3 KLASICKÁ A BUDOUCÍ DISTRIBUČNÍ SÍŤ	18
2.4 ŘÍZENÍ VÝKONU V INTELIGENTNÍCH SÍTÍCH	20
2.5 HVDC VEDENÍ A ELEKTROMOBILITA	22
2.5.1 HVDC vedení	22
2.5.2 Elektromobilita	24
3 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA V SÍTÍCH SMART GRID	25
3.1 DEFINICE VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY	25
3.1.1 Hodnocení role napětí ve VE	26
3.1.2 Hodnocení role proudu ve VE	27
3.1.3 Hodnocení role spínací frekvence VE	29
3.2 ZAPOJENÍ VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY V CHYTRÉ SÍTI	30
3.3 APLIKACE MODERNÍ VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY V CHYTRÉ SÍTI	32
3.4 INTELIGENTNÍ TRANSFORMÁTOR	35
3.5 APLIKACE VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY	36
3.5.1 FACTS	36
3.5.2 Výkonová elektronika pro akumulátorové systémy	38
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na nové aplikace výkonové elektroniky v oblasti inteligentních sítí, tedy smart grids. Text je rozdělen do tří částí. První část obecně představuje polovodiče a polovodičové součástky, které jsou využívány v zařízeních, jako jsou výkonové měniče, usměrňovače a střídače. Je zde stručně popsán princip, vývoj a problematika jednotlivých druhů polovodičových součástek. Od výkonových diod po moderní prvky na bázi SiC a GaN, které s pokrokem technologie jejich výroby stále nabývají na důležitosti, díky svým jedinečným vlastnostem, daných především šířkou jejich zakázaného pásma ($>3\text{eV}$). Druhá část se zabývá konceptem smart grid, tedy tzv. chytrou sítí, která je odpovědí na současný trend vývoje v oblasti energetiky, kterým je snižování emisí skleníkových plynů a zavádění nízkouhlíkových technologií. Tento koncept přináší řadu řešení pro zvýšení efektivity, stability, udržitelnosti výroby, přenosu, distribuce a spotřeby elektrické energie. Těchto vlastností je dosahováno především díky vzájemné komunikaci jednotlivých prvků sítě a možnosti okamžité reakce na aktuální stav. Chytrá síť umožňuje lokální využívání energie z místních obnovitelných zdrojů energie, které je výhodné jak pro spotřebitele, tak daného dodavatele. V třetí části je popsána funkce výkonové elektroniky v moderní síti a nové možnosti, které jsou díky ní realizovatelné. Je zde také porovnání komerčně nabízených součástek vyrobených z křemíku se součástkami na bázi širokopásmových polovodičů z hlediska dosahovaných jmenovitých hodnot napětí, proudu a spínací frekvence. Na základě tohoto porovnání jsou zmíněny oblasti, ve kterých pravděpodobně v budoucích letech bude hrát významnou roli rozšíření součástek na bázi SiC a GaN. Na konci práce jsou zmíněny některé aplikace výkonové elektroniky, které mohou být implementovány do chytré sítě.

Seznam symbolů a zkratk

BPL.....	technologie pro širokopásmové přenosy po el. síti
DG.....	označení pro lokální využívání obnovitelných zdrojů
ES.....	elektrizační soustava
FREEDM.....	budoucí dodávka a management obnovitelné el. energie
GaN.....	nitrid gallitý
GE.....	General Electric
HVDC.....	vysokonapěťový přenos stejnosměrné elektrické energie
OZE.....	obnovitelné zdroje energie
PLC.....	technologie sloužící k přenosu zpráv po el. síti
SCADA.....	softwarový systém pro dispečink řízení a sběru dat
SiC.....	karbid křemíku
Smart grids	inteligentní síť
SRC.....	sériový rezonanční měnič
STATCOM.....	statický synchronní kompenzátor
T&D.....	souhrnné označení pro transformační a distribuční infrastrukturu
VE.....	výkonová elektronika

1 Polovodiče ve výkonové elektronice

Polovodiče jsou pevné látky, jejichž vodivost je závislá na podmínkách, ve kterých je provozujeme. Vodivost těchto materiálů můžeme ovlivňovat změnou podmínek vnějších (světlo, teplo, el. napětí) nebo vnitřních (znečišťující příměsi jiného prvku). Rozeznáváme polovodiče typu N (negativní) a typu P (pozitivní). Typ N vznikne přidáním pětimocného prvku do krystalové mřížky čtyřmocného (např. křemíku). Polovodič typu P lze vytvořit přidáním trojmocného prvku (např. india) do krystalové mřížky křemíku. Každou polovodičovou součástku tvoří jeden nebo více přechodů PN. Výkonové elektronické součástky se vyznačují konstrukcí, která umožňuje spínat vysoké proudy při vysokých napětích, zároveň se zachováním životnosti, nízkých ztrát a dostatečné rychlosti sepnutí či rozepnutí řízeného obvodu. Nejjednodušší polovodičovou součástkou je výkonová dioda, která je v usměrňovačích používána již déle než 70 let. Novou éru výkonových měničů zahájil výkonový tyristor, který se i v současnosti používá např. ve střídavých měničích napětí nebo řízených usměrňovačích. Umožňuje řídit proudy a napětí v řádech několika kA a kV. Nízké pracovní frekvence a nemožnost řízeného vypnutí však nedovolovali široké využití. Výkonové bipolární tranzistory umožňovali použití v pulsních měničích pro proudy do stovek ampér při napětí do 1 kV a dosahované pracovní frekvence až 20 kHz. Nevýhodou bipolárních tranzistorů je však malý proudový zesilovací činitel (max. 20). Problém s malým zesilovacím činitelem vyřešil výkonový tranzistor řízený polem (FET). U obou tranzistorů však přetrvával nedostatek, kterým je možnost jen relativně malého výkonového zatížení oproti tyristoru. V aplikacích, kde není dosahováno vysokých výkonů (do 1 kA a 1 kV), jsou však bez problému dodnes často využívány. Pro měniče, ve kterých je třeba vypínatelných součástek, byly vyvinuty GTO tyristory, které na rozdíl od běžných tyristorů umožňují také řízené vypnutí. Tím se velice zjednodušuje konstrukce výkonových střídačů a pulsních měničů. GTO tyristory jsou nyní nahrazovány IGCT tyristory s řízenou integrovanou řídicí jednotkou, které překonávají GTO především tím, že umožňují vyšší frekvenci spínání. [9]

1.1 Historie polovodičových součástek

Prvním milníkem v objevování vlastností polovodičů je rok 1821, kdy Thomas Seebeck objevil polovodičové vlastnosti síranu olovnatého. Roku 1833, Michael Faraday představil teplotní závislost polovodičů. V roce 1873 Willoughby Smith objevil citlivost selenu na světlo, tři roky poté již byla známa usměrňovací schopnost selenu. V Bellových laboratořích byl roku 1947 vynalezen první tranzistor, na to navázal roku 1958 Jack Kilby vyrobením prvního integrovaného obvodu, který v jednom pouzdře obsahoval čtyři tranzistory, což udalo další směr rozvoje elektroniky. Samotné výkonové polovodičové součástky, které tvoří základ všech moderních výkonových měničů, jsou známy již zhruba od roku 1955 (výkonová dioda). Následně v roce 1958 bylo představeno hned několik zásadních výkonových součástek: tyristor, triak a GTO (gate turn-off thyristor), který umožňuje sepnutí i rozepnutí obvodu prostřednictvím signálu přivedeným na řídicí elektrodu. Následoval výkonový MOSFET (1975), IGBT (1985), IGCT (1996) a v poslední době nastupuje trend vývoje nových výkonových součástek na bázi SiC (od roku 2008) a GaN (od roku 2010). Díky pokroku technologie výroby polovodičových součástek se účinnosti nových měničů blíží téměř 100 %, což je jedním z důvodů masivního rozšíření polovodičových měničů v poslední době. Jsou totiž schopny relativně snadné změny parametrů elektrické energie, které dříve byly jen složitě uskutečnitelné. Díky frekvenčním měničům tak můžeme snadno a efektivně řídit otáčky asynchronních motorů. V oblasti přenosu elektrické energie zase výkonové polovodičové součástky umožňují efektivní využití stejnosměrných vedení. [5]

1.2 Přehled polovodičových součástek

1.2.1 Výkonová dioda

Je dvouvrstvá nelineární polovodičová součástka obsahující jeden přechod PN a dvě elektrody nazývané anoda a katoda. Nejčastěji se využívá její schopnost usměrnění střídavého proudu. Z hlediska použití v různých aplikacích, jsou na diody převážně kladeny požadavky na vysoké závěrné napětí, co nejnižší propustné napětí a rychlý přechod mezi propustným a závěrným stavem. Ve výkonové elektronice se často využívají

tzv. rychlé diody, které se vyznačují velkou odolností vůči rychlým změnám napětí a jsou používány jako ochrany spínacích prvků při spínání induktivních zátěží. Spínací prvky které je potřeba chránit pomocí těchto diod bývají vypínatelné součástky (IGCT, IGBT nebo GTO).

1.2.2 Výkonový tranzistor

Tranzistor je aktivní třívrstvá polovodičová součástka, která je tvořena dvojicí přechodů PN. Základní vlastností tranzistorů je schopnost malým napětím nebo proudem na vstupu řídit spínání či vypínání velkých výkonů na výstupu. Tranzistorů rozeznáváme několik druhů: unipolární, bipolární a bipolární tranzistor s izolovaným hradem, který je prakticky jejich kombinací. Výkonové tranzistory jsou základním prvkem frekvenčních měničů či spínaných zdrojů. Rozdíl mezi univerzálním a výkonovým tranzistorem je převážně v nutnosti výkonový tranzistor chladit z důvodu větších ztrát, ke kterým dochází při přenášení většího výkonu, proto se jejich pouzdra konstruují tak, aby na ně bylo možné namontovat chladič. Výkonové tranzistory používáme tam, kde spínáme velké proudy a hlavně v aplikacích, kde je nezanedbatelná výkonová ztráta vzniklá takovým způsobem využívání tranzistoru, při kterém často nachází ve stavu, kdy není ani zcela otevřený či zcela zavřený.

1.2.3 IGBT

Bipolární tranzistor s izolovanou řídicí elektrodou je integrovaná kaskádní kombinace bipolárního tranzistoru PNP s unipolárním tranzistorem. Výsledkem tohoto spojení je, že čip má hradlo izolované tenkou vrstvou oxidu a proud do báze je tedy řízen napětím přivedeným na vstupní unipolární tranzistor. PN přechod na kolektorové straně injektuje minoritní nosiče do kanálu, čímž dojde k sepnutí. IGBT tranzistory jsou široce využívané v oblastech napájecích zdrojů, frekvenčních měničů pro asynchronní motory nebo pro synchronní motory s permanentními magnety, přenosu energie a také se často vyskytují v měničích pro větrné a solární elektrárny. Hlavními důvody širokého rozšíření jsou nízké statické i dynamické ztráty plynoucí z malé tloušťky čipu, odolnost vůči přetížení a také

velký rozsah pracovních proudů a napětí. Při potřebě přenášet velké proudy je možné jednotlivé IGBT řadit paralelně a rozložit tak přenášený výkon mezi několik součástek. Bezpečná pracovní oblast napětí a proudu je dána tepelnými ztrátami, které se zvyšují s rostoucí spínací frekvencí. Nejsou proto schopny pracovat s tak vysokými frekvencemi spínání jako např. MOSFET. Využití IGBT našli především v nízkonapětových střídačích.

1.2.4 MOSFET

MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor) je v současnosti asi nejrozšířenější typ unipolárního tranzistoru, u kterého se do základního substrátu difuzí vytvoří dvě silně legované oblasti opačného typu polovodiče. K těmto oblastem se připojí elektrody S (source) a D (drain), mezi kterými je řídicí elektroda G (gate), která je oddělena tenkou vrstvou izolantu (nejčastěji oxidu křemičitého), která způsobuje podstatné zvětšení vstupního odporu. Po přiložení dostatečně velkého správně orientovaného napětí na řídicí elektrodu se na povrchu základního polovodiče vytvoří tzv. inverzní vrstva a tranzistorem začne procházet proud. Na rozdíl od bipolárního tranzistoru, tedy řídicí elektrodou unipolárního tranzistoru, žádný proud neteče. Místo toho je řízen napětím přivedeným na řídicí elektrodu. Použití je podobné jako u bipolárních tranzistorů, tedy může sloužit například jako spínač, či zesilovač. MOSFETy však ve většině oblastí elektroniky klasické bipolární tranzistory vytěsnili, a to díky svým vlastnostem jako jsou např. napětíové řízení, vysoká vstupní impedance, dobrá teplotní stabilita a vysoká hodnota výkonového zesílení. Ve výkonové elektronice bylo dříve využití MOSFETů limitováno napětím kolem 600 V z důvodu křemíkové technologie. V současnosti však již není problém vyrábět tyto tranzistory na bázi SiC či GaAs. Tím se rozšířila možnost aplikace těchto součástek i do oblastí s vysokými napětími a frekvencemi.

1.2.5 Výkonové tyristory

Tyristor je obecně používaný název pro bipolární spínací součástky, kterých existuje celá řada a rozlišují se dle nejrůznějších hledisek. Jedny z nejvýznamnějších jsou např. čtyřvrstvé triody. Tyristor je v zásadě čtyřvrstvá součástka tvořená třemi přechody PN. Má

tři elektrody, které nazýváme anoda (A), katoda (K) a hradlo (G). Používá se především tam, kde je zapotřebí bezeztrátové regulace, které je schopen díky minimálnímu zbytkovému proudu. Tyristory bývají používány především v řízených usměrňovačích a měničích střídavého proudu s tzv. síťovou komutací, která využívá periodické změny polarity napětí ve střídavé síti.

1.2.6 GTO

Tyristor GTO (Gate turn-off thyristor) je čtyřvrstvá polovodičová součástka, která je kladným signálem na řídicí elektrodu zapnuta a pomocí záporného řídicího impulsu vypnuta, čímž slučuje výhody klasického tyristoru a bipolárního tranzistoru. GTO tyristory mají oproti klasickým tyristorům řídicí elektrodu rozprostřenou do celého průřezu a také celkové plošné členění vrstev tvořících přechody je složitější. Při vypínání součástky mohou vznikat úzká vodivá vlákna protékána proudem, což může zapříčinit lokální ohřev tak velký, že dojde k proražení součástky. Tento jev se eliminuje použitím odlehčovacích obvodů, tzv. snubberů, které jsou tvořené paralelně připojeným nenabitým kondenzátorem, který při vypínání odvádí část proudu mimo vypínanou součástku a snižuje tak strmost nárůstu napětí. Nevýhodou pak je vysoká hodnota vypínacího proudového impulsu a také relativně velký přídržný proud. GTO s výkony jednotek MW pracující s frekvencemi řádově několika stovek hertz, dominovaly v nejrůznějších měničích, až do vytlačení součástkami IGBT a IGCT, které je nahradily převážně z důvodu rychlejšího a spolehlivějšího vypínání. [9]

1.2.7 IGCT

GTO tyristory, které byly vyvinuty pro výkonové měniče napětí mají tu nevýhodu, že při jejich vypínání vznikají značné výkonové ztráty, které mohou způsobit zničení součástky. Tento problém vyřešili modernější IGCT (Integrated gate-commutated thyristor), které mají integrovaný řídicí obvod. Princip vypínání je podobný jako u GTO, rozdíl však je v procesu vypínání. V případě IGCT je kladen požadavek na tvrdost a velkou rychlost vypínání, čehož je dosahováno velkým proudem přivedeným na řídicí elektrodu

(přes 3 kA/ μ s). Řídící obvod umožňuje velmi rychlé vypnutí, čímž se eliminují problémy s nežádoucím ohřevem vzniklým velkými vypínacími proudy. Je však nutné dosáhnout co nejnižší hodnoty parazitní indukčnosti v obvodu řídící elektrody (jednotky nH). Díky tomu jsou IGCT také schopny pracovat s vyššími spínacími frekvencemi při napětích do 6 kV a proudy až 6 kA. [9]

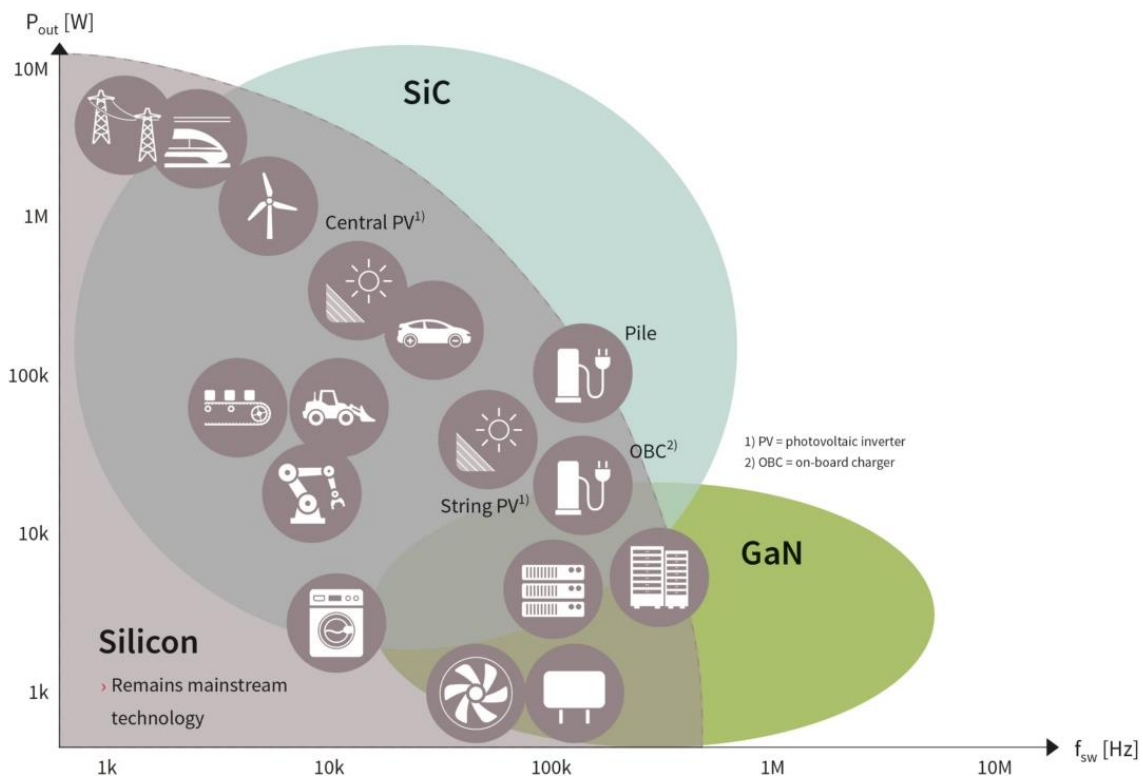
1.3 Polovodičové součástky na bázi SiC a GaN

1.3.2 SiC

Kvůli obecnému přesvědčení, že u křemíkových součástek se již blížíme technologickému vrcholu tohoto materiálu, sílí snaha vědeckých týmů po objevení nových materiálů, které by svými vlastnostmi byly schopny předčít možnosti běžně používaných materiálů. Mezi takovéto vlastnosti patří např. stále rostoucí požadavek na velikost proudového i napěťového zatížení, současně s rostoucí spínací frekvencí. Pro takovéto aplikace se jeví vhodný SiC, a to především díky své šířce zakázaného pásma a vysoké tepelné vodivosti. Do nedávné doby masovému nasazení součástek na bázi karbidu křemíku ve výkonových zařízeních bránila relativně složitá výroba čistého monokrystalu, který je základním prvkem pro výrobu polovodičových součástek. V posledních letech však došlo ke zdokonalení technologie výroby a specializovaní výrobci již takové součástky nabízejí. Mezi hlavní přednosti SiC oproti běžně používanému křemíku patří malý úbytek napětí, vyšší proudová hustota a velmi nízký tepelný odpor spolu se schopností pracovat při vysokých teplotách a možnost více než desetinásobné spínací frekvence. Reálné využití našel tento materiál v Schottkyho diodách, u nichž ve všech parametrech předčí diody křemíkové, které jsou používány jako zpětné diody ve vysokofrekvenčních pulzních měničích nebo napěťových střídačích. Na trhu jsou již také tranzistory MOSFET na bázi SiC, které nahrazují starší MOSFET a IGBT součástky na bázi Si. Tyto karbid křemíkové MOSFETy nachází využití např. v oblasti střídačů pro fotovoltaické elektrárny. [3] [4] [9]

1.3.3 GaN

V posledních letech širokopásmové polovodiče, jako karbid křemíku a nitrid gallitý, jsou považovány za jedny z nejvíce perspektivních materiálů pro další vývoj výkonových elektronických součástek. Díky svým specifickým fyzikálním vlastnostem, kterými jsou především široké zakázané pásmo (>3 eV), vysoké průrazné napětí (2-4 MV/cm) a nízká koncentrace vlastních nosičů náboje, slibují výrazné zvýšení energetické účinnosti. SiC je již v mnoha odvětvích úspěšně využíván, součástky na bázi GaN také již našli své využití, zejména pak v odvětvích, ve kterých se pracuje s velmi vysokými frekvencemi při nižších výkonech. Dřívějšímu nasazení tohoto materiálu bránil především omezený výkon a problémy se spolehlivostí. Tyto problémy pramenily z toho, že tepelná roztažnost a velká šířka krystalové mřížky GaN není v souladu s materiálem, ze kterých se GaN vytváří, čímž docházelo k častým defektům krystalové struktury (nejčastěji dislokace). Tyto defekty při výrobě dlouhou dobu zapříčiňovaly praktickou nemožnost využití potenciálu tohoto materiálu. [2] V současnosti díky pokroku technologie výroby, již mnozí výrobci nabízejí spolehlivé součástky z tohoto materiálu, které nacházejí uplatnění především v oblastech jako jsou servery, telekomunikace, audiotechnika nebo bezdrátové nabíjení.



Obr. 1 – Použití polovodičových materiálů v závislosti na výkonu a frekvenci [10]

2 Smart grids

2.1 Princip a účel chytrých sítí

Industrializace a hospodářský rozvoj byly v historii spojeny se schopností člověka využít přírodních zdrojů energie ke svému prospěchu. S postupným rozvojem a průmyslovými revolucemi stále rostla potřeba vyrábět větší množství energie a také ji efektivně přenášet od zdrojů ke spotřebičům. Více než dvě století byly jako zdroj této energie využívány neobnovitelné zdroje energie, které však vykazují nežádoucí vedlejší účinky v podobě znečištění životního prostředí. Ve druhé polovině 20. století se otevřela možnost využívat jadernou energii, což na jednu stranu zlepšilo výhledy do budoucna vzhledem k omezenému množství fosilních paliv, ale současně vyvolalo jisté bezpečnostní a politické problémy. Řešení globální poptávky po energii dlouhodobě udržitelným způsobem je proto nyní celosvětovým úkolem jak technickým, tak politickým. Síťové a bezdrátové komunikační systémy přinesly v posledních letech další průmyslovou revoluci. Novodobý průmysl a ekonomika jsou založeny na digitální komunikaci, která vychází ze široké dostupnosti informací, a tím se mění směr technologického rozvoje. [8]

Kombinace potřeby připojení většího množství obnovitelných zdrojů, u kterých nelze dostatečně předvídat jimi dodávaný výkon a potřeby na zvýšení efektivity sítě zapříčinilo tlak na změnu stávající sítě. Odpovědí na tyto problémy se zdá být koncept chytré sítě, která je schopna efektivně využívat nepredikovatelnou výrobu obnovitelných zdrojů elektrické energie a okamžitě na ni reagovat na straně spotřeby. Další problém pro stávající síť může představovat masové rozšíření hybridních či plně elektrických automobilů, které zajisté bude mít nemalý vliv jak na velikost odebíraného výkonu, tak na tvar denního diagramu zatížení elektrizační soustavy. Chytrá síť je schopna inteligentního řízení nabíjení elektromobilů či jiných velkokapacitních baterií s ohledem na stabilitu sítě i ekonomiku spotřebitelů. Koncept chytré sítě by měl v budoucnu umožňovat využití baterie elektromobilu jako spotřebiče, ale také jako zdroje, pokud to bude v danou chvíli zapotřebí.

Základ chytrých sítí spočívá v obousměrné komunikaci v reálném čase mezi zdroji elektrické energie a spotřebiteli, a to jak v místním, tak v globálním měřítku. Získání a sdílení těchto informací zajišťují moderní inteligentní elektroměry známé jako AMM, které jsou schopné obousměrného bezdrátového přenosu dat a také vlastního řízení spotřeby daného objektu. Takto získané informace distributorům umožňují nabízet různé tarify v závislosti na aktuálním množství a ekonomičnosti výroby a spotřeby. Využívání AMM

přináší tedy výhody jak pro dodavatelskou, tak spotřebitelskou stranu. Mezi hlavní výhody pro spotřebitele patří využívání výhodných tarifů, možnost využití konceptu smart home a celkový přehled o bilanci odebírané energie. Na druhé straně, za nevýhodu celého systému může být považována možnost zneužití přenášených dat třetí stranou, kdy sledování odběru energií může být zneužito k predikci nepřítomnosti osob v objektu. Potřeba zavedení chytrých sítí tedy pramení mimo jiné z novodobého energetického trendu, kterým je snižování emisí oxidu dusíku a závislosti na fosilních palivech, čehož se dosahuje rapidním zvyšováním podílu instalovaného výkonu obnovitelných zdrojů. [5]

2.2 Smart grids v EU a ČR

K dosažení cílů Evropské unie v oblasti energetické politiky a boje proti změnám klimatu bude nezbytná značná inovace infrastruktury elektrické energie. Jedním z hlavních kroků k dosažení stanovených limitů bude muset být zvýšení efektivity přenosu elektrické energie společně se zapojením velkého podílu obnovitelných zdrojů, a to jak malých lokálních, tak i např. velkých solárních či větrných parků. Jedním z projektů na podporu tohoto odvětví je tzv. SET Plan (Strategic Energy Technology Plan). Jedná se o celoevropský projekt s cílem splnit závazky EU v oblasti snížení emisí skleníkových plynů pomocí urychlení rozvoje a zavedení nízkouhlíkových technologií.

2.2.1 Česká technologická platforma Smart Grid

Je zájmové sdružení založené roku 2009 subjekty působícími v oblasti energetiky, jejichž cílem je vytvoření konceptu chytré sítě vhodného pro inovaci energetické soustavy České republiky. Mezi zakládající členy patří kromě několika firem působících v oblasti energetiky také Západočeská univerzita v Plzni. Jedním z cílů tohoto sdružení je vytvoření tzv. strategické výzkumné agendy, která by mapovala pravděpodobné budoucí potřeby v oblasti výzkumu a vývoje prvků chytré sítě pro ČR v příštích 10 letech. [7]

2.2.2 Projekt smart region ve Vrchlabí

Je projekt realizovaný týmem ČEZ distribuce, který probíhal v letech 2010 – 2015. Smart region Vrchlabí se v roce 2011 stal součástí projektu nazvaného Grid4EU, který byl spolufinancován Evropskou unií. Jednalo se o první projekt tohoto typu v ČR, jehož cílem bylo především zavedení a testování technologií chytré sítě v distribuční soustavě mikroregionu Vrchlabí. V průběhu pěti let vybavil ČEZ nejrůznější odběratele toho mikroregionu téměř pěti tisíci chytrých snímačů a vybudoval infrastrukturu pro automatizaci a monitoring vrchlabské elektrické sítě. Systém je navržen tak, aby umožňoval efektivní využívání lokálních obnovitelných zdrojů a současná automobilová doprava mohla být nahrazena elektromobily.

2.3 Klasická a budoucí distribuční síť

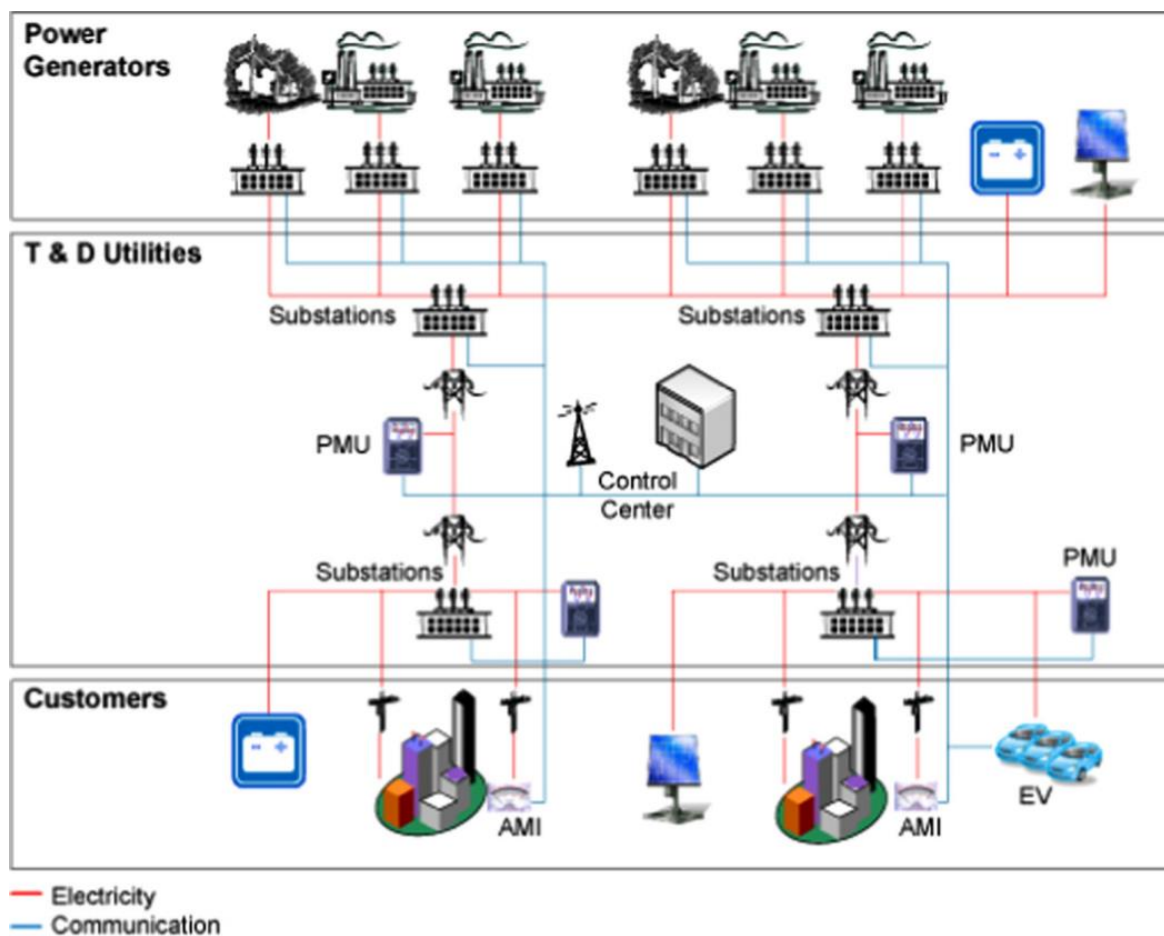
Hlavním charakteristickým znakem klasického modelu distribuční sítě je, že celý proces přenosu energie je jednosměrný, začínající u velkých elektráren, pokračující přes přenosovou soustavu na hladině VVN a distribuční soustavu zpravidla na napětíových úrovních VN a 0,4 kV až ke koncovému místu spotřeby. Topologie sítě je navržena tak, aby co nejlépe vyhovovala jednosměrnému toku energie, jelikož v našich podmínkách jsou majoritními zdroji především velké elektrárny v počtu desítek kusů připojené do přenosové soustavy na hladině VVN. Se stoupajícím zastoupením malých zdrojů připojených do stávajících sítí VN nebo NN mohou vznikat problémy, kterými jsou např. nižší kvalita dodávané energie plynoucí z vlivu vyšších harmonických na tvar výsledného průběhu napětí, zvýšené ztráty v důsledku transformací z nižších napětíových hladin na vyšší nebo nemožnost efektivního řízení zdrojů v závislosti na aktuální situaci v ES. [13]

Hlavním úkolem smart grids je aplikace „chytrých“ prvků pro umožnění řízení jednotlivých zařízení, které tvoří distribuční soustavu. Taková zařízení jsou např. distribuční trafostanice, odpínače, chytré elektroměry, akumulární systémy atd. Nasazením lokálního systému pro řízení distribuční soustavy využívajících informace poskytované inteligentními prvky bude umožněno ovládat chod distribuční soustavy pro maximalizaci efektivity lokální výroby, přenosu, spotřeby a akumulace ve sledovaném regionu. Lokální řídicí systémy pak umožní funkci v autonomním režimu, či start ze tmy. Veškeré lokální systémy by měly být integrovány do centrálního řídicího systému, který bude zajišťovat smysluplnou koordinaci jednotlivých regionálních řídicích systémů. Detailní či agregovaná data o provozních charakteristikách, která byla získána chytrými elektroměry a dalšími

čidly jsou zasilána do centrálního systému ke zpracování a vyhodnocení. Tyto informace následně energetickým společností umožňují aplikaci pokročilých funkcí pro tarifikaci spotřebitelů nebo analýzu a predikci spotřeby. [13]

Mezi hlavní cíle, které slibuje koncept smart grid oproti konvenčnímu typu ES tedy patří optimalizace provozu distribuční soustavy společně s umožněním řízení spotřeby širokého spektra různých odběratelů, zvýšení efektivity využití lokálních obnovitelných zdrojů a jejich optimalizace pro umožnění ostrovního provozu, minimalizace výpadků a snížení jejich dopadu na zbytek sítě pomocí dočasné změny její konfigurace. Nárůst efektivity provozu a odolnosti celého energetického systému, dostupnost detailních informací o využívání elektrické energie pro odběratele, rozložení špiček v denním diagramu zatížení a zvýšení stability sítě při nenadálých výkyvech v množství vyráběné energie zapříčiněných OZE. [13]

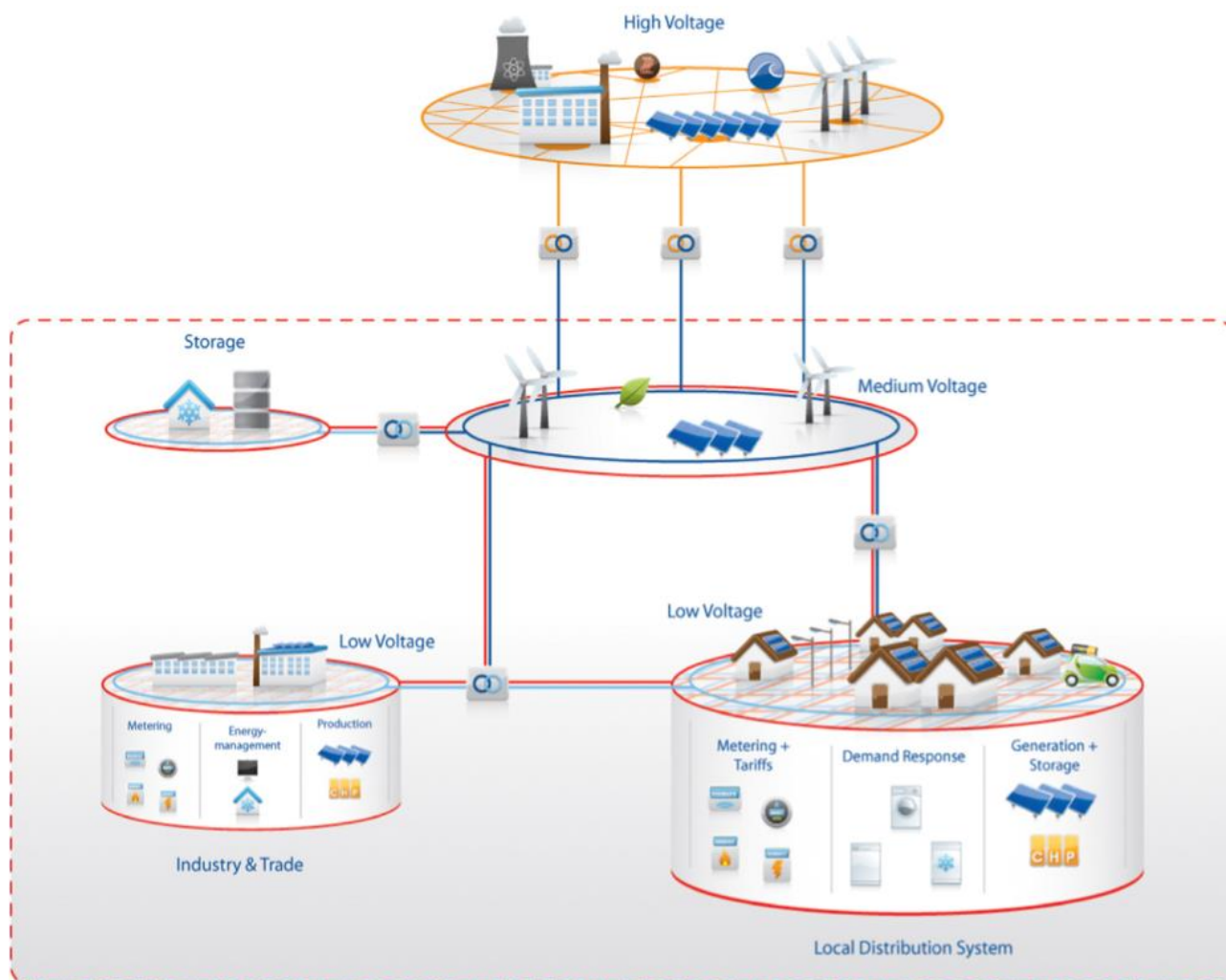
2.4 Řízení výkonu v inteligentních sítích



Obr. 2 – Výroba, řízení a komunikace mezi distribuční sítí a odběrateli [11]

Řízení inteligentní sítě je naznačeno v Obr. 2. Obrázek ilustruje výrobu, transformaci, přenos a distribuci (T&D) a zákaznické sekce. Červená barva značí elektrické vedení a modrá barva znázorňuje komunikační vedení, které umožňuje komunikaci a přenos dat mezi jednotlivými prvky sítě. V sekci výroby je několik obnovitelných zdrojů, které jsou doplněny systémem pro skladování energie pro zajištění stability. Sekce T&D je tvořena rozvodnami a řídicím centrem, ve kterém je porovnávána okamžitá hodnota vyrobené a spotřebované energie v pozorované síti. Řídicí mechanismus získává a odesílá informace přes telemetrické funkce chytré sítě a dálkově ovládá spínací prvky zahrnující výkonovou elektroniku. Dalším prvkem integrovaným do systému jsou jednotky pro měření fázových hodnot dodávaného výkonu (PMU). Sekce T&D zahrnuje mnoho dalších prvků pro ovládání a monitorování přenášeného výkonu zahrnující širokou škálu výkonových měničů, které jsou doplněny řadou regulátorů, senzorů a systémů typu SCADA. Spodní část diagramu sestává ze zákazníků, u kterých je

nainstalována pokročilá měřicí infrastruktura (AMI) v každém uzlu, za účelem monitoringu a selekce cenového tarifu v reálném čase. Infrastruktura AMI může s řídicím centrem komunikovat bezdrátově nebo pomocí signálů vedených přímo po elektrickém vedení. Technologie PLC (power line communication) jsou v poslední době využívány od kontroly domácí energetické bilance až po internetové služby založené na širokopásmovém využívání elektrického vedení, tzv. BPL (broadband power lines).



Obr. 3 – Schéma chytré sítě komunikující pomocí PLC [11]

Na Obr. 3 je naznačeno inteligentní schéma řízení sítě s infrastrukturou PLC. Stupně řízení mohou být rozděleny do sekcí podle napěťových úrovní, jak je naznačeno na Obr. 3. V sekci vysokého napětí jsou umístěny primární elektrárny, sekce středně velké napětí pokrývá zařízení DG (distributed generation) a centrum T&D (transmission and distribution). Sekce nízkého napětí zahrnuje spotřebitele a komunikační infrastrukturu. Transformátorové bloky snižují napěťovou hladinu mezi jednotlivými sekcemi tak, aby zákazníkům bylo umožněno propojení DG zdrojů s rozvodnou sítí. Úsek VN zahrnuje také

systémy pro uložení energie, které zajišťují efektivní využití obnovitelné energie, zatímco nízkonapěťová sekce zahrnuje jednotlivé OZE, kterými mohou být např. malé solární nebo větrné elektrárny. Obousměrná komunikace probíhající mezi vysokonapěťovými a nízkonapěťovými sekcemi je prováděna pomocí technologie BPL, kde jsou v reálném čase vyhodnocovány data o měření, řízení spotřeby, odezvy na poptávku nebo stavu systémů pro akumulaci energie. Pokrok, který představují možnosti chytrých sítí, rychle zvýšil využitelnost OZE pro domácnosti i průmyslové odběratele, kteří mají zájem o energetickou správu, řízení procesu výroby a skladování el. energie. V návaznosti na to byl zaveden nový termín FREEDM (future renewable electric energy delivery and management), který pojmenovává systém pro integraci OZE do rozvodné sítě.

2.5 HVDC vedení a elektromobilita

2.5.1 HVDC vedení

Využití stejnosměrných vysokonapěťových energetických sítí je nyní často spojováno s nástupem moderních inteligentních sítí. Díky flexibilnímu řízení, které umožňují inteligentní sítě, se otevírají nové možnosti nasazení HVDC vedení tam, kde je využití střídavé sítě méně praktické. Samotný „souboj“ střídavého a stejnosměrného proudu je veden již od osmdesátých a devadesátých let 19. století, kdy na straně stejnosměrného proudu stál Edison a za střídavým proudem Westinghouse. Teslovi vynálezy indukčních stojů a pokroky v transformátorech předurčili AC k vítězství. V 19. století transformátory umožnily přechod mezi různými úrovněmi napětí, čímž bylo umožněno koncového využití malého napětí, a zároveň efektivní dálkový přenos na vysokých napěťových úrovních.

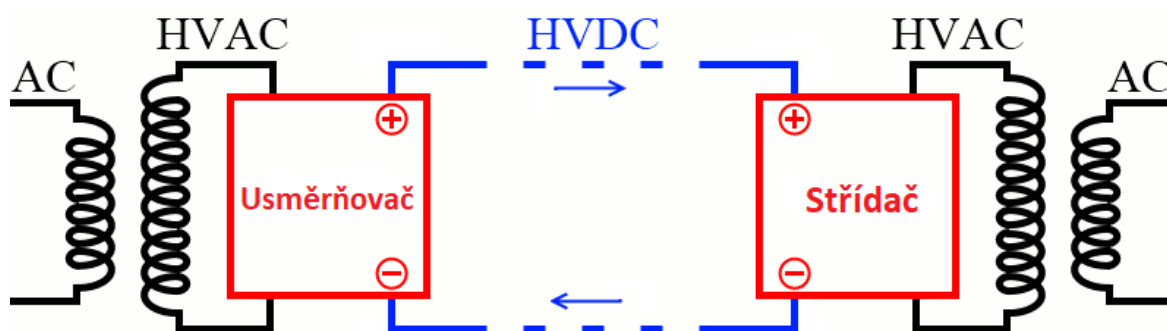
Navzdory počátečním výhodám AC byl stále DC využíván jako spojovací prvek zejména tam, kde bylo potřeba propojit dva systémy s rozdílnými frekvencemi. Příkladem takového systému může být vedení Mountiers – Lyon o délce 200 km na napěťové úrovni 75 kV DC o přenášeném výkonu zhruba 22 MW fungující ve Francii od roku 1906 do roku 1936. Ve třicátých letech 19. století dosáhl rtuťový usměrňovač, původně představený roku 1902 Peterem Hewittem, takové úrovně, že umožňoval pomocí převodu AC-DC-AC spojení sítě s frekvencí 50 Hz s elektrickou železniční sítí 16 2/3 Hz. Vylepšení rtuťového usměrňovače Uno Lammem vedlo k prvnímu modernímu komerčně využitelnému HVDC systému s délkou 98 km a parametry 20 MW, 100 kV DC, spojující ostrov Gotland se

Švédskem. Od počátku 70. let začaly být rtuťové usměrňovače nahrazovány tyristorovými spínači. Jak rtuťové, tak tyristorové usměrňovače jsou závislé na stavu AC sítě, a to z důvodu komutace z jedné součástky na druhou. Vývoj tranzistorů IGBT a dalších součástek s vlastní komutací vede k vzestupu napěťových měničů HVDC. Existuje několik případů, kdy HVDC přenos poskytuje výhody oproti AC přenosu.

První možností, kdy je výhodné nasazení HVDC vedení, je propojení nesyntronních sítí. Příkladem může být HVDC propojení mezi Velkou Británií a Evropou, kde oba systémy mají jmenovitou frekvenci 50 Hz, ale nejsou synchronní. Nebo propojení dvou elektrických sítí s různou frekvencí jako v případě Japonska, kde severovýchod země používá frekvenci 50 Hz a jihozápad 60 Hz.

Druhým případem je oblast přenosu energie na velmi dlouhé vzdálenosti, kde bývá HVDC vedení hospodárnější z důvodu nižší ceny za kilometr vedení, což je dáno tím, že při stejnosměrném přenosu není spotřebovávána jalová energie a není tak omezena délka vedení z důvodu nutnosti kompenzace jalového výkonu. Stanice HVDC jsou však dražší než AC stanice, proto má v současné chvíli opodstatnění jen u nadzemních vedení delších než 700 km a kabelových vedení delších než 80 km.

Třetí důvod pro využití HVDC systému může být potřeba propojení dvou AC systémů takovým způsobem, aby v důsledku poruchy na jednom systému nedošlo k přenosu nežádoucích vlivů na druhý systém. Toho bývá dosaženo použitím AC-DC-AC stanic.



Obr. 4 – Schéma AC-DC-AC stanice

Čtvrtý případ, kdy je vhodné zavedení HVDC vedení je, pokud stávající HVAC vedení není schopné přenášet potřebný výkon a z prostorových důvodů není možné jeho rozšíření. Využití stávajících stožárů HVAC pro nové vedení HVDC umožní přenášet větší výkon bez dalších zásahů do okolní krajiny. Takovéto řešení vyžaduje např. projekt

Ultranet v Německu, kde původní stožáry pro střídavé vedení budou použity pro HVDC přenos velkého množství energie z větrných elektráren na severu Německa do průmyslových oblastí.

2.5.2 Elektromobilita

Jelikož zásoby neobnovitelných zdrojů nejsou nevyčerpatelné, začala společnost vyvíjet tlak na výzkum nových technologií k udržení aktuálních standardů za pomoci energie získaných z obnovitelných zdrojů. Elektrická energie je považována za nejčistší formu energie vůbec, proto stále roste tlak ze strany politiků a ekologů na její využívání v oblastech, ve kterých dosud majoritní roli zastupují neobnovitelné zdroje produkující množství škodlivých látek. Jednou z těchto oblastí je také automobilová doprava.

Názvem elektromobil můžeme pojmenovávat širokou škálu dopravních prostředků od osobních automobilů po autobusy, které ke svému pohonu využívají elektrickou energii. Lze sem také částečně zahrnout tzv. hybridní pohony, u kterých bývají kombinovány dva pohony s různými zdroji energie, kterými zpravidla bývají elektromotor a spalovací motor. Hlavní výhodou elektromobilů jsou nulové lokální emise produkované v místě provozu vozidla. To je důležitý aspekt především ve velkých městech s vysokou hustotou zalidnění, kde často v důsledku hustého provozu vozidel se spalovacím motorem dochází k lokálnímu nadlimitnímu znečištění ovzduší. Další nezanedbatelnou výhodou elektromobilů je také téměř nehlukný provoz.

Provoz většího množství elektromobilů vyžaduje širokou síť nabíjecích stanic, které jsou nezbytnou podmínkou pro rozšíření osobních automobilů s elektrickým pohonem. Tyto nabíjecí stanice mohou mít různé parametry v závislosti na zdroji energie nebo typu napětí. Běžné nabíjecí stanice v ČR provozované firmou ČEZ, bývají vybaveny dvěma na sobě nezávislými třífázovými zásuvkami standardu Mennekes s parametry 32 A/400V s maximálním výstupním výkonem každé zásuvky 22 kW. Rychlonabíjecí stanice vybavené DC konektory, umožňující nabíjecí výkon až 50 kW, tyto stejnosměrné rychlonabíjecí stanice umožňují nabít až 80 % baterie elektromobilu za cca 20 minut. [14]

Stejnoseměrné rychlonabíjecí stanice nejprve napětí usměrní pomocí usměrňovače a následně přímo nabíjejí baterii elektromobilu. Výhodou tohoto způsobu je možnost přenášet velký výkon oproti střídavým nabíječkám, které přivádějí do elektromobilu střídavý proud a k usměrnění dochází až v palubní nabíječce elektromobilu, která je však limitována především rozměry a hmotností, v důsledku toho je omezen přenášený výkon.

3 Výkonová elektronika v sítích smart grid

Jedním ze zásadních prvků, důležitých pro rozvoj chytrých sítí, je výkonová elektronika. Elektrická energie vyrobená obnovitelnými zdroji jako jsou solární, větrné nebo vodní elektrárny musí být převedena na vhodný typ a velikost napětí k přenosu a následnému využití spotřebiteli. Proto jsou využívány výkonové měniče, které pracují jako propojovací prvky mezi obnovitelnými zdroji, akumulacími systémy, distribuční soustavou a spotřebiteli. Systémy založené na OZE nabízejí jisté ekonomické a ekologické výhody v porovnání s konvenčními systémy využívajícími fosilní paliva. Navíc nezávislé systémy založené na OZE mohou sloužit jako čisté a spolehlivé zdroje v mnoha aplikacích ve vzdálených venkovských oblastech, kde terén či odlehlost nedovolují připojení k elektrické soustavě napájené velkými elektrárnami. V současné době se provádí mnoho výzkumů zaměřených na zlepšení schopností takovýchto celků. Cílem je energetická nezávislost různě velkých oblastí a zajištění plně automatizovaného chodu tak, aby nebylo potřeba měnit chování uživatelů z hlediska spotřeby elektrické energie.

3.1 Definice výkonové elektroniky

Moderní výkonové polovodičové měniče lze definovat jako spínače pracující mezi stavy zapnuto a vypnuto při velmi vysokých spínacích frekvencích. Ideální přepínač, kterému se snažíme reálnými zařízeními co nejvíce přiblížit, pak má nulové ztráty výkonu při zapnutém i vypnutém stavu a je schopen spínání s libovolnou frekvencí. Reálná zařízení však samozřejmě vykazují ztráty, a to především v zapnutém stavu a při přechodu z jednoho stavu do druhého. Pro dosažení řízeného zapnutí a vypnutí jsou zapotřebí tři vývodové vypínatelné součástky, ve kterých se napětíovým nebo proudovým impulsem přivedeným na třetí elektrodu řídí sepnutí/rozepnutí daného obvodu. Proudově řízenými zařízeními jsou např. bipolární tranzistory nebo GTO. Napětíově řízené součástky, kterými jsou např. MOSFETy nebo IGBT, mají řídicí elektrodu pokrytou tenkou izolační vrstvou, díky které je výkon potřebný k ovládní zanedbatelný. Právě minimální výkon potřebný k řízení součástky, je hlavní výhodou napětíově řízených součástek. V moderních měničích bývá nejčastěji využívána kombinace vypínatelné součástky spolu s antiparalelně řazenou diodou, která umožňuje funkci obousměrného vedení proudu a schopnost jednosměrného blokování napětí. Tato konfigurace je využívána téměř ve všech měničích napětí používaných ve fotovoltaice, větrných elektrárnách a elektrických pohonech. Pokročilejší

zařízení jako jsou reverzně vedoucí IGBT (RC-IGBT), mají v sobě již integrovanou reverzní diodu a není tak žádná další externí antiparalelní dioda. Sériové zapojení vypínatelné součástky a diody je schopné blokování napětí v obou směrech, díky tomu je často používáno v proudových měničích. Opět existují pokročilejší prvky, jako jsou RB-IGBT (reverzně blokující IGBT), které samy blokují oba směry, a není tak externí sériová dioda potřeba.

Obecně lze říci, že nejdůležitějšími vlastnostmi každého zařízení jsou napěťové a proudové hodnoty a rychlost přepínání, která může být použita k porovnání schopností jednotlivých druhů zařízení. Pro aplikace v různých napěťových hladinách jsou vyvinuta příslušná zařízení s vhodnými průraznými napětími. V oblasti obnovitelných zdrojů a průmyslových pohonů se typicky nasazují výkonová zařízení s průrazným napětím vyšším než 600 V. Pro napájení počítačů, mobilů a další drobnější elektroniky se zpravidla vyžaduje průrazné napětí mezi 20 až 600 V, v závislosti na konkrétní aplikaci. Různá komerčně nabízená zařízení jsou srovnatelná, pouze pokud jsou navržena tak, aby odolávala stejnému průraznému napětí z důvodu závislosti výkonu na jmenovitém napětí zařízení. [15]

3.1.1 Hodnocení role napětí ve VE

Novodobé výkonové polovodičové součástky jsou vyráběny z waferu (plátek monokrystalu, na kterém se leptáním vytvářejí mikroobvody), vertikálně rozděleného na několik vrstev P a N s hlavními kontakty po stranách čipu. Ve vypnutém stavu je vodivost velmi nízká, naopak při sepnutém stavu se snažíme dosáhnout vodivosti co nejvyšší. Pracovní napětí, na které je dané zařízení navrženo, bývá mnohem nižší než průrazné napětí, a to proto, aby součástka spolehlivě vydržela přechodná přepětí a zároveň byla zaručena dlouhodobá spolehlivost. Průrazné napětí je typicky definováno jako hodnota napětí, při kterém dojde k dosažení kritické hodnoty elektrického pole E_c , které je dáno příslušným materiálem, ze kterého je polovodičová součástka vyrobena. Pro křemík je E_c asi 20 V/ μm , zatímco u širokopásmových polovodičových materiálů jako je GaN a SiC se E_c blíží 300 V/ μm . Z hlediska konstrukce součástek je nejběžnější metodou ke zvýšení průrazného napětí rozložení elektrického pole do větší vzdálenosti. K dosažení zmenšení povrchového elektrického pole pod kritickou hodnotu bývá používána technologie junction termination, jejímž cílem je rozšíření oblasti působení elektrického pole. Křemíkový tyristor s průrazným napětím 8 kV vyžaduje vyprázdněnou oblast širokou více než 1,3 mm

tak, aby se špičkové elektrické pole udrželo pod hodnotou 10 V/ μm . Při použití SiC součástek lze dosáhnout stejných parametrů při šířce vyprázdněné oblasti menší než 70 μm . Z toho je patrné, že pro součástky na bázi SiC je mnohem jednodušší dosáhnout velmi vysokého průrazného napětí. V literatuře jsou popsány SiC IGBT s hodnotami blokovacího napětí až 27 kV, což je výrazně vyšší hodnota, než která byla kdy dosažena pomocí křemíku (13 kV). [15]

3.1.2 Hodnocení role proudu ve VE

Jmenovitý proud je volen tak, aby při sepnutém stavu procházející proud generoval jen takové teplo, které nezpůsobí překročení maximální provozní teploty. Cílem výzkumu v této oblasti je zvyšování proudové hustoty pro dané průrazné napětí. Pro zařízení vykazující lineární poměr napětí a proudu (MOSFET) lze proudovou hustotu vyjádřit následujícím vztahem: (1a) [15]

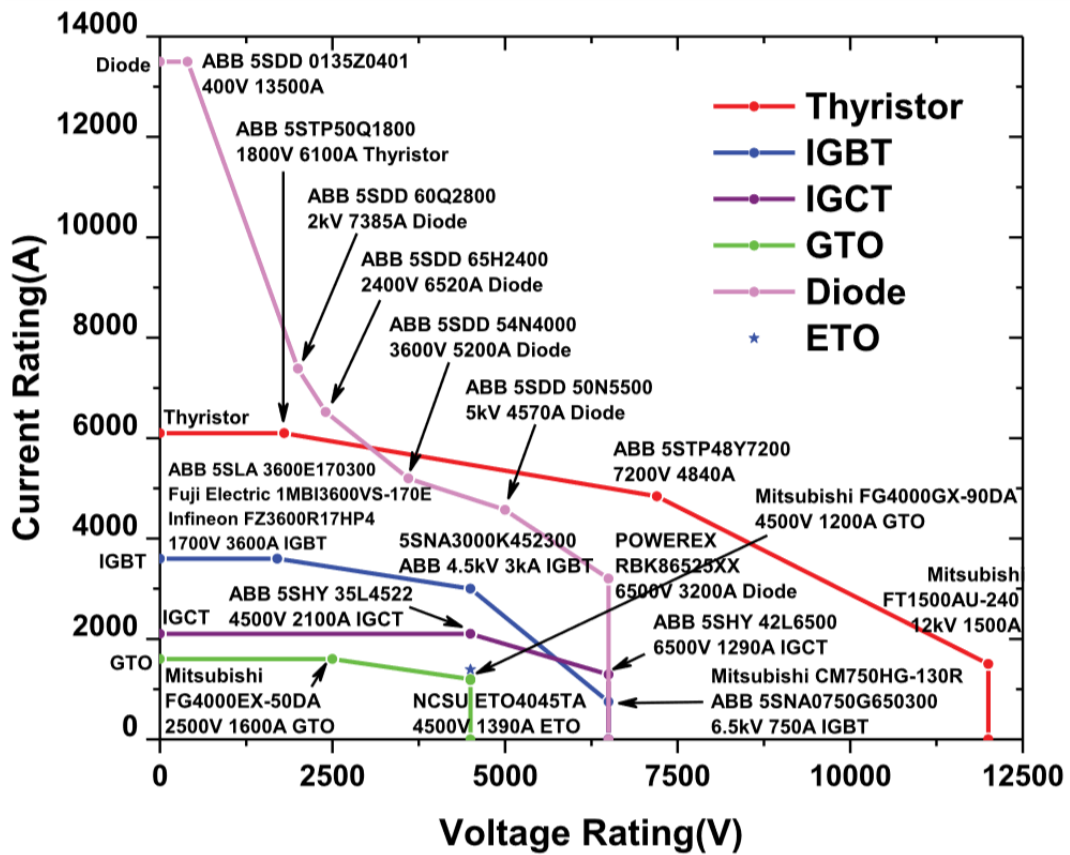
$$J = \sqrt{\frac{T_{j,\max} - T_{\text{case}}}{R_{jc-sp} * R_{on-sp}}}$$

Pro součástky s nelineární V-A charakteristikou (dioda, tyristor, IGBT) lze použít vzorec: (2b) [15]

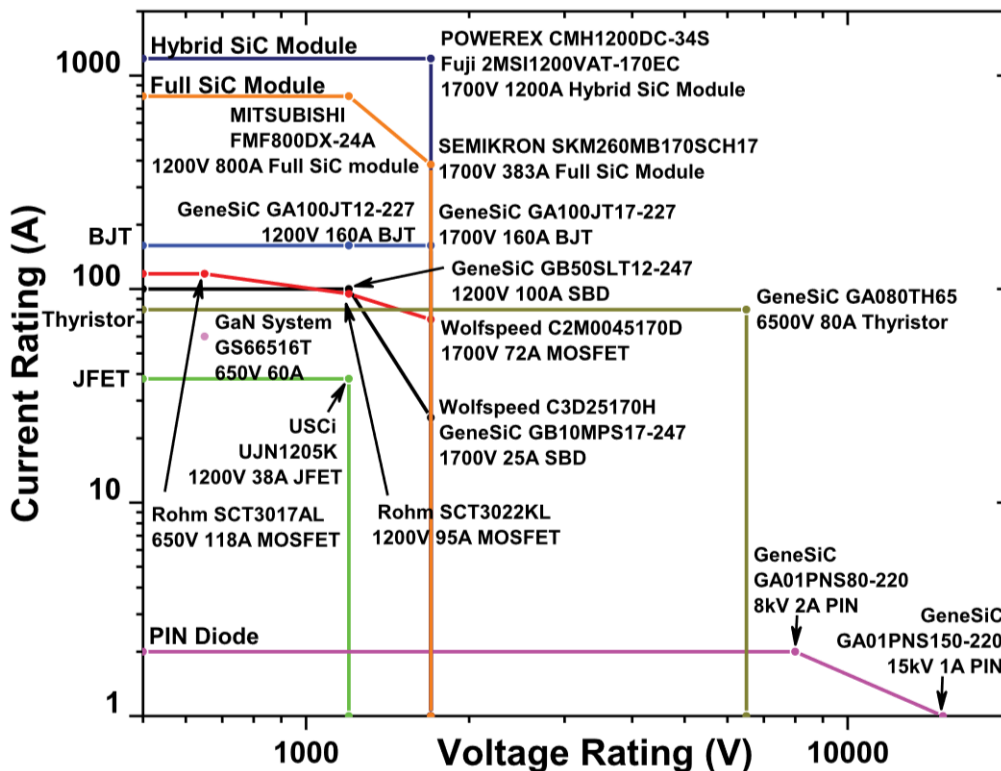
$$J = \frac{T_{j,\max} - T_{\text{case}}}{R_{jc-sp} * V_F}$$

- R_{jc-sp} představuje specifický tepelný odpor od spoje k okraji, vyjádřený ve $^{\circ}\text{C} * \text{cm}^2 / \text{W}$
- R_{on-sp} je specifický odpor v sepnutém stavu v Ω / cm^2
- $T_{j,\max}$ je maximální teplota spoje
- T_{case} je teplota pouzdra
- V_F představuje úbytek napětí na součástce při sepnutém stavu ve voltech

Z (1a) je zřejmé, že stonásobné snížení R_{on-sp} by mohlo mít za následek desetinasobné zlepšení proudové hustoty, se kterou je zařízení schopno pracovat. U nelineárních součástek pak lze dosáhnout vyšší proudové hustoty snížením úbytku napětí V_F . Ze vzorce $I = J * A_{\text{čipu}}$, kde $A_{\text{čipu}}$ představuje velikost daného čipu (zpravidla nepřesahuje 1cm^2) vyplývá, že vyšší hustota proudu umožňuje zmenšení velikosti čipu, které následně vede ke snížení ceny dané součástky. [15]



Obr. 5 – Porovnání jednotlivých komerčních součástek na bázi křemíku pomocí závislosti jmenovitých hodnot proudu a napětí [15]



Obr. 6 – Porovnání jednotlivých komerčních WBG součástek v závislosti na jmenovitých hodnotách proudu a napětí [15]

Jedním ze způsobů, jak zhodnotit moderní výkonová zařízení, je porovnání jmenovitých hodnot proudů a napětí, se kterými jsou schopny pracovat. Takové srovnání křemíkových součástek je provedeno na Obr. 5 a porovnání součástek na bázi širokopásmových polovodičů je na Obr. 6.

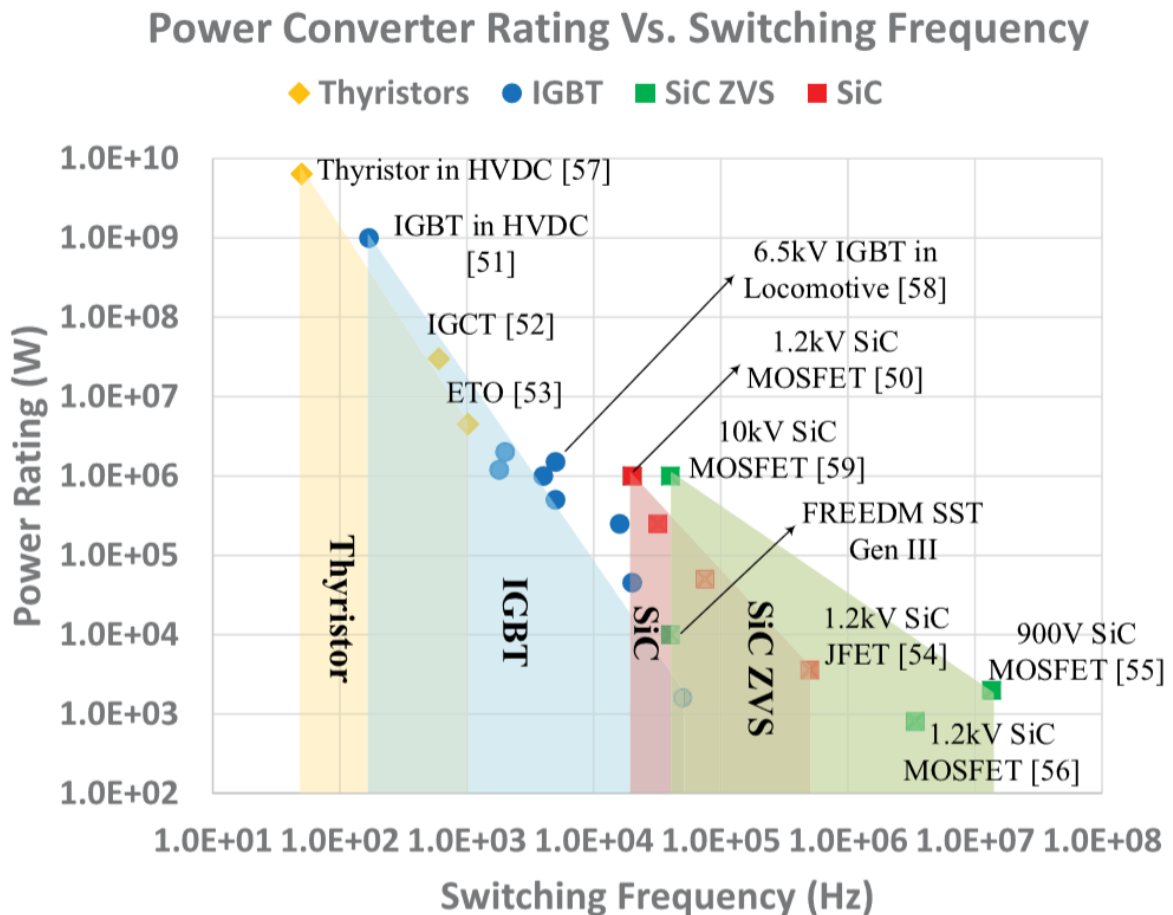
Z Obr. 5 je patrné, že křemíkový tyristor a dioda dosahují nejvyšších hodnot napětí a proudu. To je důvodem, proč sériově zapojené výkonové křemíkové tyristory jsou nejvyužívanějším prvkem pracujícím ve vysokonapěťových aplikacích, kde jsou schopny pracovat s výkony až 8 GW při napětích dosahujících 800 kV. [15]

3.1.3 Hodnocení role spínací frekvence VE

Moderní výkonové měniče vyžadují výkonové součástky, které jsou schopny spínání při vysokých frekvencích. Výhodou vysokých spínacích frekvencí je zlepšená schopnost dynamické odezvy, snížená hmotnost a velikost pasivních součástí měniče. Spínací frekvence je dalším důležitým faktorem, který může sloužit k vzájemnému porovnání výkonových zařízení. Horní hranice spínací frekvence bývá zpravidla dána velikostí ztrát, které vznikají při přechodech mezi sepnutým a vypnutým stavem. Maximální uváděná spínací frekvence tedy není teoretickým limitem daného zařízení, ale kompromisem mezi ztrátami při sepnutém stavu a při přechodech mezi stavy. Obecně lze konstatovat, že unipolární výkonové součástky mohou přepínat mezi stavy s mnohem vyššími frekvencemi, protože spínací ztráty prakticky způsobuje pouze vybíjení parazitních kapacit. Pro bipolární součástky spínací ztráty souvisí také s nahromaděním a odstraněním přebytečných nosičů náboje. To je důvod, proč jsou bipolární vysokonapěťové součástky značně pomalejší než ty, které jsou konstruovány pro práci s nižším napětím.

Na Obr. 7 jsou porovnány parametry moderních polovodičových součástek. Tyristorové měniče, jsou schopné dosahovat velmi vysokých výkonů, ale jen s omezenými spínacími frekvencemi, jsou proto vhodné pro využití v oblastech HVDC vedení, kde je dosahováno frekvencí jen 50 resp. 60 Hz, protože nemají schopnost řízeného vypnutí hradlem. Křemíkové tyristory jsou konstruovány tak, aby umožňovaly obousměrné blokování napětí. K dosažení vypnutí se využívá proměnné polarity napětí střídavé sítě, tedy mají tzv. vnější komutaci. [15]

Naopak vypínatelné součástky jako jsou GTO, IGCT, IGBT mají schopnost přímé komutace a jejich vypínání je možné řídit pomocí impulsů přivedených na řídicí elektrodu. V energetických systémech středního výkonu jako jsou fotovoltaické elektrárny, větrné elektrárny nebo elektrické pohony, bývají nejčastěji nasazované 600-1700 V IGBT pracující se spínacími frekvencemi 10-20 kHz. [15]



Obr. 7 – Využití typů součástek v závislosti na přenášeném výkonu a spínací frekvenci [15]

3.2 Zapojení výkonové elektroniky v chytré síti

Výkonová elektronika je klíčovým komponentem veškerých systémů sloužících k regulaci elektrické energie. Prvky, jako jsou HVDC kontroléry, FACTS, STATCOM (statický synchronní kompenzátor) a další nejrůznější měniče, mají za cíl umožnit a zjednodušit přenos a distribuci elektrické energie. Další nespornou výhodou využívání výkonové elektroniky je možnost nastavení přesné velikosti frekvence nebo amplitud napětí a proudu, díky tomu je pak možné dosáhnout zvýšení kvality energie dodávané

spotřebitelům. Jedním z nejnovějších odvětví, ve kterých našla výkonová elektronika využití, jsou asistenční systémy pro monitoring, komunikaci a simulaci v reálném čase jako jsou např. OPAL-RT nebo RTDS. Tyto asistenční systémy se schopností autonomní komunikace a řízení, umožňují instalaci inteligentní sítě a vedení komunikační infrastruktury, která umožňuje získávání a předávání informací o stavu vysokonapěťových systémů mezi vzdálenými pracovišti. Konvenční struktura sítě je proto hlouběji studována z důvodu přechodu na více flexibilní a inteligentnější systém, který má více funkcí než jen jednosměrný přenos energie. Současný trend vývoje struktury elektrické soustavy je založen na rostoucím zapojení drobných zdrojů a akumulátorových systémů, které pracují s energií vyrobenou větrnými či solárními elektrárnami, případně s energií získanou spalováním biomasy. Distribuovaný systém elektrické soustavy, který je definován jako smart grid, využívá inteligentní komunikační technologie, a to kabelové či bezdrátové, podle toho, která technologie je pro danou aplikaci vhodnější. Efektivní a masová integrace obnovitelných zdrojů energie a tzv. microgrids do globální elektrické soustavy vyžaduje zapojení poměrně složité řídicí logiky. Stejnoseměrné i střídavé microgrid systémy mají tendenci dodávat vyrobenou energii různé kvality, a to v důsledku různých pracovních podmínek provozu elektronických měničů. V současnosti je implementováno několik metod řízení, tak aby bylo dosaženo co nejmenších rušivých účinků na průběhy napětí a proudu a byly co nejvíce eliminovány harmonické složky.

DC řízení, které se využívá zejména tam, kde výroba energie je závislá na solárních elektrárnách nebo na palivových člancích, probíhá převážně v DC-DC měničích. Na druhé straně, paralelní řízení je vyžadováno jak pro střídavou, tak i pro stejnosměrnou přeměnu energie a je většinou zaměřena na řízení toku výkonu. Droop control je jednou z nejnovějších metod, které se zaměřují na činnou a jalovou složku výkonu s ohledem na hodnotu frekvence a amplitudu napětí. Paralelní provoz měničů, který je nezbytný při převodu HVDC na HVAC, je vyrovnáván několika regulačními smyčkami ke zvýšení spolehlivosti a flexibility. [11]

3.3 Aplikace moderní výkonové elektroniky v chytré síti

Výkonová elektronika používaná v chytrých sítích a v součinnosti s obnovitelnými zdroji bývá propojujícím článkem mezi různými prvky sítě, typicky mezi stejnosměrnými prvky (akumulátory, FV elektrárny atd.) a střídavými prvky (distribuční soustava, elektromotory atd.). U třífázového systému bývají typicky nasazovány taková zařízení, která mají průrazné napětí alespoň 1200 V, u jednofázového systému mohou být použita zařízení s průrazným napětím 600 V. Z toho důvodu se předpokládá, že zařízení s průrazným napětím 600 V na bázi GaN nebo SiC by mohla být masově zavedena do jednofázových systémů FV střídačů. Hlavním důvodem nasazování těchto součástek jsou možnosti využití jejich vysokofrekvenčních schopností k dosažení větší kompaktnosti a zvýšení účinnosti již existujících řešení. Jedním z oblastí použití takovýchto zařízení by mohla být palubní nabíječka pro elektromobily. V takovýchto případech mají novodobá vysokofrekvenční zařízení výhody, kterými jsou např. měkké spínání, kompaktnost, obousměrný směr přenosu energie. V mnoha oblastech, ve kterých dodnes dominovaly křemíkové IGBT, jsou dnes připraveny součástky na bázi SiC, které jsou jim schopné plnohodnotně konkurovat a v mnoha směrech otevřít nové možnosti. Na Obr. 8 je tabulka publikovaná Dr. Alexem Q. Huangem v roce 2017, která popisuje využití VE v oblastech elektromobility, akumulace energie, FV a větrných elektráren, HVDC přenosu, statických kompenzátorů sítě a chytrých sítích. Je zde několik důležitých, již existujících a také teprve vznikajících aplikací moderní VE v oblasti smart grids a obnovitelných zdrojů. V posledním sloupci je popsána motivace pro hledání lepší technologie pro danou aplikaci daného energetického zařízení.

Field	Specific Applications	Typical Topology	Today's device technology	Future device technology	Major motivation for new device technology
Electric Vehicle	Level-2 Onboard Charger (OBC)	DAB DC/DC [150-156]	Si IGBT	600V GaN/SiC MOSFET	High frequency operation, compact design, EMI size reduction, high efficiency
	WPT for EV	Resonant converter [157-158]	Emerging application	600V GaN/SiC MOSFET	High frequency operation, compact design, EMI size reduction, high efficiency
	DC Fast charger	Three phase boost rectifier or Vienna Rectifier [170].	Si IGBT/PIN	1,200V-1,700V SiC MOS/JBS >1200V RB-IGBT	Increased power level to >200 kW or more, increased DC bus voltage to 1000V or more
Energy Storage	Utility Scale Storage	2L VSI, 3L-NPC, T-NPC Rectifier, or MMC [171]	Si IGBT/PIN	>1,200V-1,700V SiC MOS/JBS technology	>MW power level requires reduction of size, cost while improving the efficiency
PV	PV Microinverter (<1 kW)	Isolated Flyback DC/AC [147-149]	Si MOS(<200V) 600V Si ultrafast diode	GaN HFET <200V 600V SiC SBD/JBD diode	High frequency operation, compact design, EMI size reduction, high efficiency
	Single Phase PV Inverter (1 to 10 kW)	H4, H5, H6, HERIC or other inverter variations[169]	Si IGBT (600V)	600V GaN HFET	High efficiency Reduced filter size and overall weight reduction
	3-phase string , central and utility scale PV inverters	3L-NPC or T-NPC [169]	1200V and 600V IGBT/PIN diode	1,700V SiC MOS/JBS >1,200V RB-IGBT	Bus voltage >1000V, high efficiency, small filter size and overall weight reduction
Wind	Synchronous Generator Full Power AC/DC/AC	3L-NPC or T-NPC [169]	1700V IGBT/PIN Diode	>1,700V SiC MOS/JBS >1,200V RB-IGBT	Increase operation voltage to reduce wiring cost for >>MW level converter systems
HVDC	VSC for AC/DC and DC/AC conversion	MMC[51]	3.3 and 4.5 kV IGBT/PIN diode	15 kV SiC GTO/ETO/PIN	Reduced number of MMC cells
	DC Circuit Breaker	Hybrid DC Circuit Breaker[125-127]	4.5 kV IGBT in series	>15 kV SiC GTO/ETO/PIN	Reduce number of devices in series for
FACTS	Reactive Power Compensation	SVC STATCOM using MMC Topology [53]	4.5 kV Si SCR 3.3 and 4.5 kV IGBT/PIN diode.	20-50 kV SiC Thyristor 15 kV SiC IGBT/GTO/ETO/PIN	Reduce devices in series Reduced number of MMC cells in >200 kVdc applications.
	Smart Grid	Solid State Transformer to replace Line Frequency Transformer (LPT)	DAB or LLC in input series and output parallel (ISOP) [172]	Emerging application	1,200-1,700V SiC MOS/JBS 15 kV SiC MOSFET/JBS diode
MVDC Grid DC/DC Connection		Single Dual Active Bridge or LLC [167, 173]	Emerging application	15 kV SiC MOS/JBS	Simple topology to achieve medium frequency (10 to 50 kHz) and high efficiency
		DAB or LLC Resonant Converter [173]	Emerging application		Isolated DC/DC between MVDC and LVDC grid

Obr. 8 – Klíčové elektronické prvky pro inteligentní sítě a obnovitelné zdroje [15]

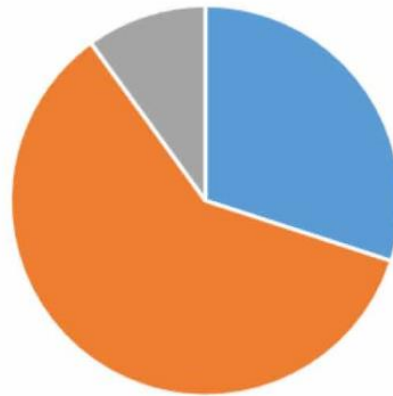
SiC MOSFETy a JBS diody poskytují vynikající dynamické parametry v porovnání s Si IGBT a PIN diodami, proto umožňují zvýšení účinnosti, která je vždy důležitým parametrem, nehledě na sledovanou část systému. Přestože mnoho takových součástek je již komerčně nabízeno, hromadnému nahrazení stávající technologie za ty nově vyvinuté však stále může bránit to, že integrace technologií na bázi SiC do elektrického systému vyžaduje hluboké pochopení vlastností systému, včetně elektromagnetické kompatibility a tepelných vlastností při různých pracovních podmínkách jednotlivých prvků. Praktickému nasazení nejmodernějších součástek, samozřejmě zatím v mnoha případech brání vyšší náklady na SiC technologii, které se však se zvýšením objemu výroby a získáváním zkušeností při výrobním procesu budou do budoucna snižovat. Na Obr. 9 je v grafu naznačen koncept možné úspory nákladů na systém založený na SiC, vyznačená úspora je dána zmenšováním pasivních součástek, nižšími požadavky na chlazení a vyšším absolutním výkonem.

A Si power conversion system



■ Si devices ■ Rest of system

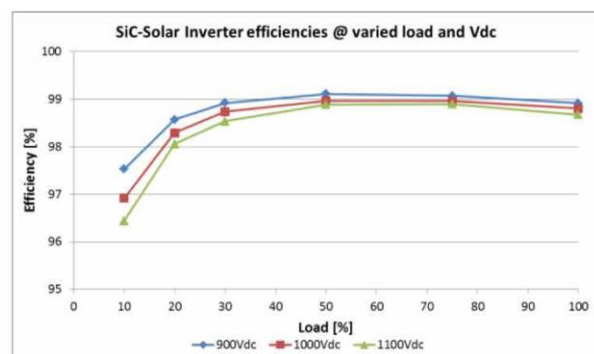
A SiC power conversion system



■ SiC devices ■ Rest of system ■ Saving

Obr. 9 – Potenciální snížení nákladů při nasazení SiC technologie [15]

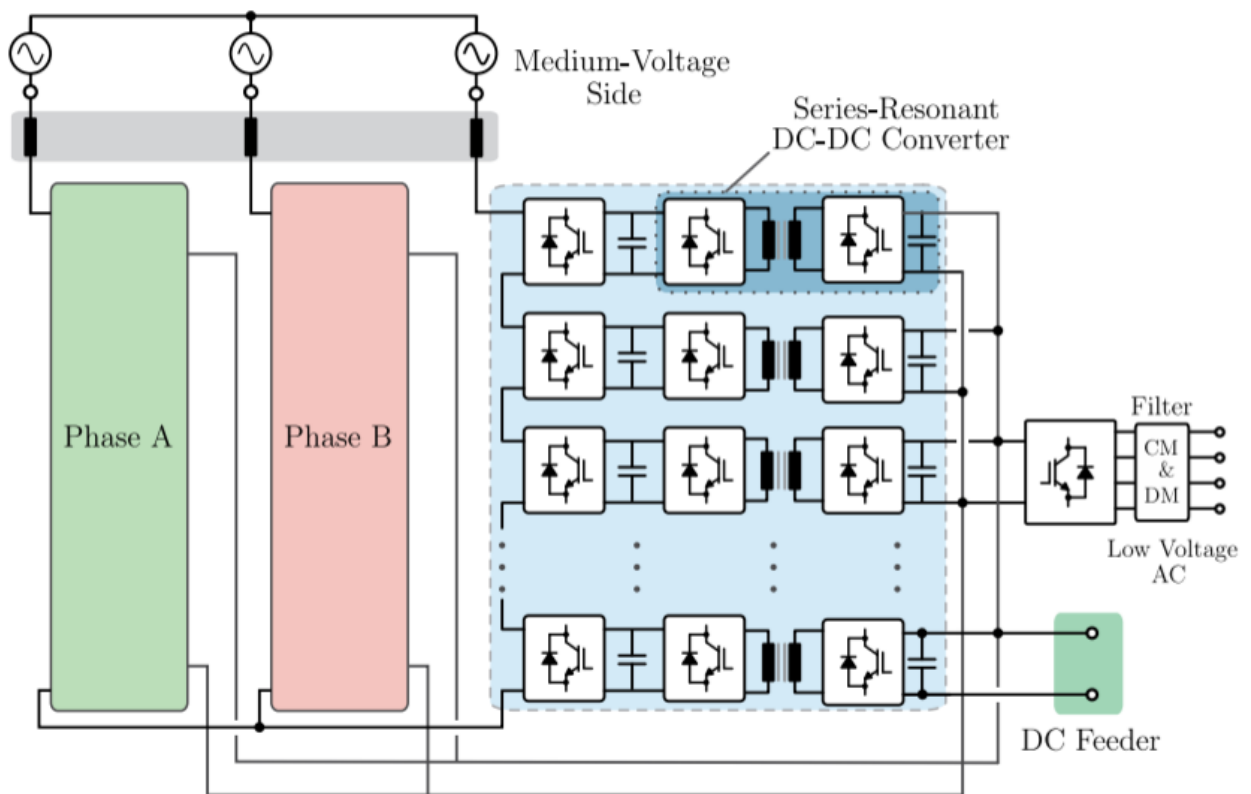
Vzhledem ke svému potenciálu zvýšení energetické účinnosti současně se snížením nákladů na zbytek systému by mohl být FV střídač prvním směrem masového nasazení výkonových zařízení na bázi SiC. Požadované hodnoty napětí (1200-1700 V) nepředstavují pro SiC žádný problém. Pro střešní FV systémy, u kterých bývá omezena hmotnost celého systému např. na 1 kW/kg je mnoho komerčně nabízených zařízení používajících IGBT na bázi křemíku nevhodná, z důvodu neschopnosti tento požadavek splnit. Byly také vyvinuty vysoce výkonné centralizované střídače založené na SiC, jako je např. 1 MW jednofázový fotovoltaický střídač od GE, který díky špičkovému modulu SiC MOSFET, dosahuje účinnosti 99 % při vstupu 900 V DC. Ten je také na Obr. 10 spolu s charakteristikou jeho účinnosti v závislosti na zatížení pro tři různě velké vstupní napětí.



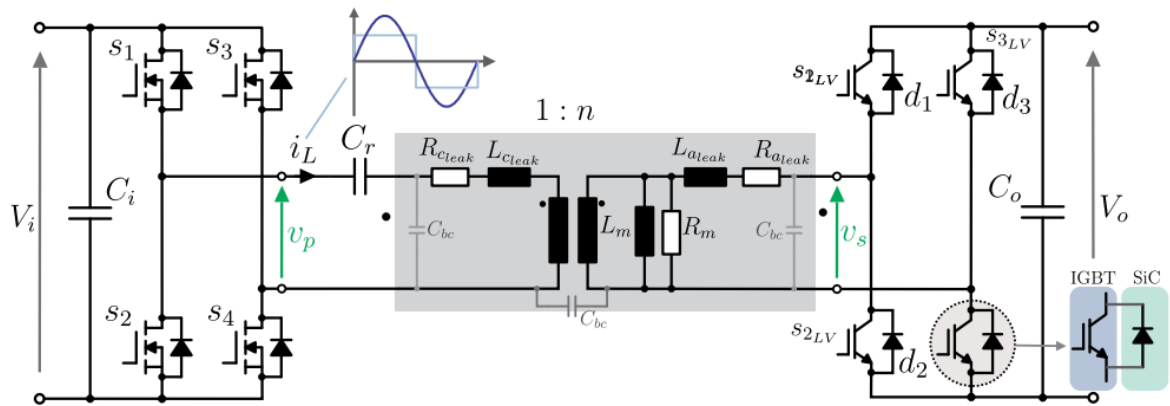
Obr. 10 – 1 MW SiC fotovoltaický střídač od GE a charakteristika jeho účinnosti [15]

3.4 Inteligentní transformátor

Inteligentní transformátory jsou nezbytné součástí inteligentní sítě neustále pracující na regulaci napětí a udržování kontaktu s řídicím systémem celé sítě tak, aby byla umožněna vzdálená správa a přenos informací o aktuálním stavu na vstupu a výstupu. Díky procesu optimalizace napětí udržuje transformátor přesnou hodnotu přenášeného výkonu, který je v daný okamžik zapotřebí a okamžitě reaguje na výkyvy uvnitř rozvodné sítě, ve které působí jako regulátor napětí. Nasazením inteligentních transformátorů okamžitě dochází ke snížení spotřeby energie v důsledku optimalizace dodávaného napětí a také k ochraně elektrických zařízení na straně nízkého napětí před přepětím. Obr. 11 zobrazuje modulární schéma celého inteligentního transformátoru s vyznačenou částí SRC (sériový rezonanční měnič), která je pak detailněji zobrazena na Obr. 12.



Obr. 11 – Modulární architektura inteligentního transformátoru s DC-DC částí realizovanou pomocí sériového rezonančního měniče [16]



Obr. 12 – Topologie SRC včetně parazitních parametrů [16]

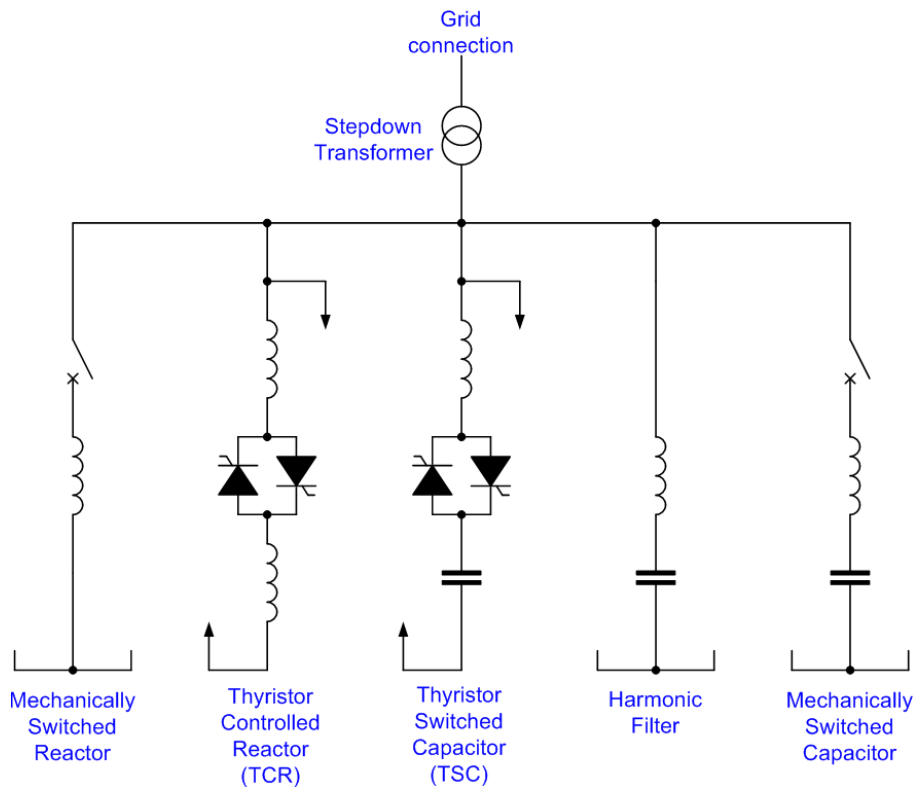
10 kW prototyp SRC navržený v [16] je slibná verze DC-DC modulu pro inteligentní transformátor, a to především díky vysoké spolehlivosti a účinnosti, kterou autor uvádí 98,61 %. Nejvíce problematickým prvkem z hlediska spolehlivosti bývá rezonanční kapacita, která je na Obr. 12 označena jako C_r , proto jsou další parametry měniče voleny s ohledem na životnost prvku C_r k zajištění spolehlivosti celého měniče. Primární strana je tvořena SiC MOSFETy, vstupní a rezonanční kapacitou, zatímco sekundární stranu tvoří kombinace IGBT se SiC diodami a výstupní kondenzátor. [16]

3.5 Aplikace výkonové elektroniky

3.5.1 FACTS

Často používaná zařízení sloužící k řízení toku činného a jalového výkonu se obecně nazývají FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems). Jejich úkolem je zvyšování spolehlivosti a umožnění řízení přenosových sítí tak, aby bylo docíleno co nejnižších ztrát na vedení. Snížením ztrát na vedení následně znamená snížení nákladů na přenos elektrické energie. Tato zařízení se skládají z kondenzátorů a tlumivek, které jsou řízeny pomocí výkonové elektroniky. [18]

SVC (Static Var Compensator) jsou kompenzátory, které bývají často používány k řízení přenášeného jalového výkonu. Jsou tvořeny kombinací tyristorově řízené tlumivky, tyristorově řízeného kondenzátoru, mechanicky spínaným kondenzátorem, mechanicky spínanou tlumivkou a harmonickým filtrem. Nahrazují nebo doplňují tak dříve používanou kompenzaci jalového výkonu pomocí přebuzených synchronních strojů. SVC kompenzátory nabízí oproti rotačním kompenzátorům rychlou odezvu a díky absenci pohyblivých částí vyžadují nižší údržbu. [18]



Obr. 13 – SVC: statický kompenzátor jalového výkonu [17]

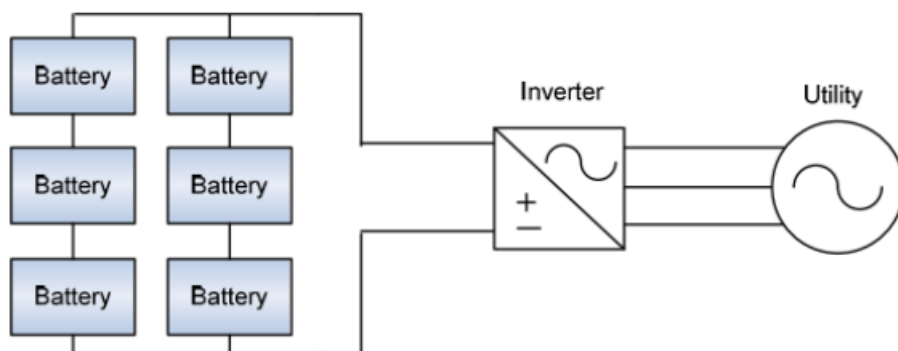
STATCOM (Static Synchronous Compensator) jsou zařízení, které dokáží v síti působit jako zdroj i jako spotřebič jalového výkonu, díky tomu umožňují široké možnosti regulace činného i jalového výkonu. Dále jsou také schopné dynamického řízení a stabilizace napětí. [18]

Firma Elcom nabízí zařízení v principu stejné jako je STATCOM, jejich zařízení ELCOM[®] je však konstruováno na nízké napětí a menší výkon. Toto zařízení dokáže regulovat jalový výkon pomocí změny velikosti a směru 1. harmonické složky proudu. Kompenzátor je tvořen třífázovým napěťovým střídačem (sestaveným z IGBT tranzistorů, které jsou řízeny pulzně šířkovou modulací), kondenzátorem a tlumivkou tvořící filtr, který zajišťuje sinusový průběh výstupního proudu.

3.5.2 Výkonová elektronika pro akumulátorové systémy

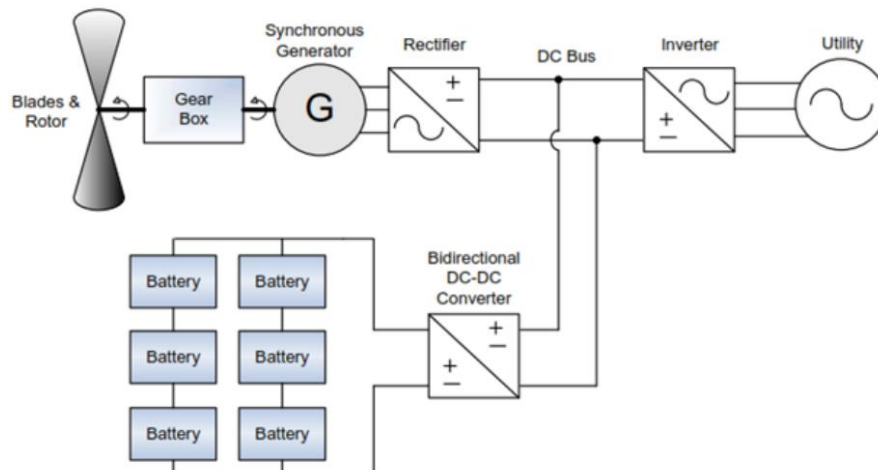
Veškeré akumulční technologie připojené do sítě využívající systém baterií potřebují převádět střídavý proud na stejnosměrný a naopak. Základním požadavkem kladeným na výkonové měniče pro akumulční systémy je možnost obousměrného toku energie.

Při nabíjení baterií je třeba převádět střídavý proud přes střídač v usměrňovačovém chodu na stejnosměrný proud, kterým se následně nabíjí akumulátor. V okamžiku, kdy je potřeba naakumulovanou elektrickou energii využít, je naopak potřeba provozovat střídač ve střídačovém chodu a zajistit převod stejnosměrného proudu, dodávaného baterií na střídavý proud s parametry sítě. Na rozdíl od fotovoltaických střídačů musejí umožňovat obousměrný tok výkonu, nemusí však být dimenzován na maximální výkon zdroje, ale jen na výkon, který je dán maximálním proudem bateriového systému. Nejjednodušší forma konfigurace je znázorněna na Obr. 14, znázorňuje bateriový systém s převodník DC-AC obsahující transformátor na AC straně. Nevýhodou této konfigurace je, že nízkofrekvenční transformátor na výstupu, činí celý měnič objemným a nákladným. Jednotlivé články akumulátoru jsou zapojeny sériově nebo paralelně v závislosti na požadované velikosti výstupního napětí a proudu. [19]



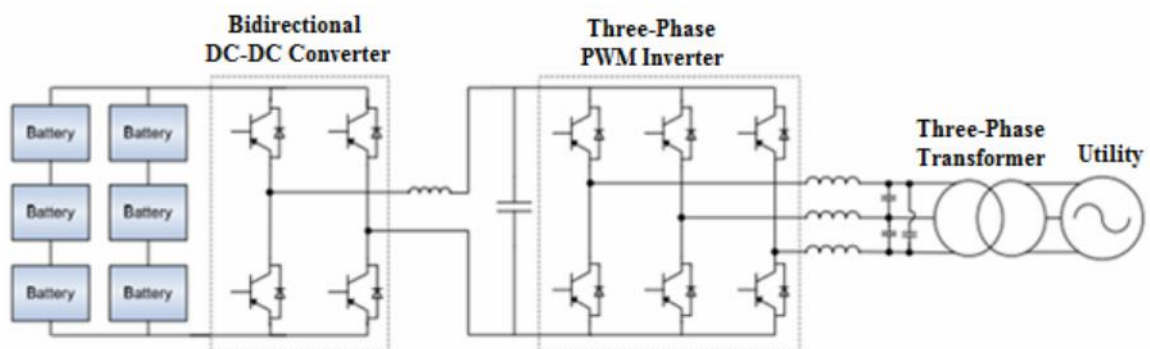
Obr. 14 – Jednoduchý systém pro připojení baterie k síti [19]

Na Obr. 15 je schématicky naznačen hybridní systém větrné elektrárny a bateriového systému. Stejnosměrný meziobvod má za úkol především zajistit dostatečně velké stejnosměrné napětí na vstupu střídače a je v něm integrována baterie pomocí stejnosměrného měniče umožňujícího obousměrný tok výkonu. [19]



Obr. 15 – Schéma hybridního systému větrné elektrárny a baterií pro microgrid systém [19]

Často využívané řešení je na Obr. 16. Jedná se o třífázový střídač spolupracující se stejnosměrným měničem, umožňujícím obousměrný tok energie, který slouží k zajištění dostatečné velikosti napětí na vstupu střídače. Výstup DC-DC měniče je přiveden na vyhlazovací tlumivku a filtrační kondenzátor, jejichž úlohou je udržení dostatečné velikosti a stability napětí a proudu pro třífázový napěťový střídač s pulzní šířkovou modulací, který řídí velikost proudu dodávaného do sítě. Pokud je třeba baterie nabíjet, začne napěťový střídač pracovat v usměrňovačovém režimu a napájí DC-DC měnič, který upraví velikost napětí na hodnotu vhodnou pro nabíjení baterií. [19]



Obr. 16 – Systém výkonové elektroniky pro bateriový systém připojený k třífázové síti [19]

Závěr

Tato práce se zaměřuje na aplikaci výkonové elektroniky ve smart grid sítích. V první části je uveden přehled nejrozšířenějších výkonových polovodičových součástek tvořících základní prvky veškeré výkonové elektroniky, která díky svému pokroku v posledních letech otevřela zcela nové možnosti a usnadnila procesy, jejichž realizace byla dříve obtížná, nákladná nebo neefektivní. Následuje představení součástek na bázi moderních širokopásmových materiálů, karbidu křemíku a nitridu gallitého, které jsou schopné dosahovat velmi zajímavých parametrů a zažívají v posledních desetiletích rozmach z důvodu zvládnutí technologie jejich výroby.

Druhá kapitola se zabývá konceptem chytré sítě, popisuje princip její funkce a důvody, které vedou k transformaci stávající sítě na tu chytrou. Smart grids se zdají být řešením k zajištění stability moderní sítě, ve které hrají podstatnou roli OZE. Obnovitelné zdroje kromě výhod z pohledu ekologie mají bohužel i jisté nevýhody z technického hlediska. Těmito nevýhodami je např. nárazová a nepredikovatelná dodávka energie nebo neschopnost FV a větrných elektráren „podržet“ síť při náhlém přetížení svou setrvačností, jako to umí rotující synchronní generátory v tepelných, jaderných a vodních elektrárnách. Chytrá síť je schopna tyto problémy eliminovat díky neustálé komunikaci mezi jednotlivými prvky tak, že je schopna zajistit stabilitu např. okamžitě reagujícími akumulačními prvky. Stoupající podíl OZE je důsledkem evropského energetického strategického plánu, jehož cílem je především zavedení nízkouhlíkových technologií. Na základě tohoto plánu jsou Evropskou unií podporovány také projekty zaměřující se na vývoj chytrých sítí. Jedním z takových projektů na našem území byl smart region Vrchlabí, realizovaný skupinou ČEZ jako součást evropského projektu Grid4EU.

V třetí kapitole je definována výkonová elektronika ve smart grid sítích a jsou zde zhodnoceny a porovnány jmenovité proudy, napětí a dosahované frekvence spínání jednotlivých druhů výkonových součástek, které jsou základem veškerých výkonových měničů. Nakonec je zde představeno několik aplikací výkonové elektroniky, které lze zasadit do inteligentní sítě a na základě komunikace s centrálním řízením následně řídit provoz těchto zařízení takovým způsobem, aby v každém okamžiku bylo docíleno rovnováhy mezi množstvím vyrobené a spotřebované elektrické energie při co nejefektivnějším provozování energetických zdrojů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BOSE, Bimal K. *Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems. Proceedings of the IEEE* [online]. 2017, 105(11), 2011-2018 [cit. 2019-03-09]. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2745621. ISSN 0018-9219.
- [2] GRECO, Giuseppe, Ferdinando IUCOLANO a Fabrizio ROCCAFORTE. Ohmic contacts to Gallium Nitride materials. *Applied Surface Science* [online]. 2016, 383, 324-345 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.04.016. ISSN 01694332. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433216307565>
- [3] KŘEČEK, Tomáš. *Součástky na bázi SiC* [PDF], Katedra elektroniky, VŠB-TU, 2007
- [4] VIRT, Karel. *Součástky na bázi SiC ve výkonové elektronice* [PDF], Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, ZČU, 2011
- [5] KAPOUN, Vladislav. *Smart grids – chytré sítě v energetice*, VUT v Brně, 2013
- [6] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>
- [7] *Česká technologická platforma Smart Grid* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://www.smartgridcz.eu>
- [8] LISERRE, Marco, Thilo SAUTER a John HUNG. Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine* [online]. 2010, 4(1), 18-37 [cit. 2019-06-01]. DOI: 10.1109/MIE.2010.935861. ISSN 1932-4529. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5439057/>
- [9] Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti - Časopis Elektro - Odborné časopisy. *Odborné časopisy* [online]. Copyright © 2014 [cit. 14.03.2019]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/moderni-vykonove-polovodicove-prvky-a-jejich-aplikacni-moznosti--14473>
- [10] Infineon: *Wide Bandgap Semiconductors (SiC/GaN)* [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.infineon.com>
- [11] COLAK, Ilhami, Ersan KABALCI, Gianluca FULLI a Stavros LAZAROU. A survey on the contributions of power electronics to smart grid systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, 47, 562-579 [cit. 2019-05-10]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.031. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115001847>
- [12] LIANG, Zhigang, Rong GUO, Jun LI a Alex Q. HUANG. A High-Efficiency PV Module-Integrated DC/DC Converter for PV Energy Harvest in FREEDM Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics* [online]. 2011, 26(3), 897-909 [cit. 2019-06-12]. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2107581. ISSN 0885-8993. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5699400/>
- [13] HORÁLEK, Josef, SOBĚSLAV, Vladimír. *Technologie a požadavky na inteligentní síť pro Smart Grid* – periodikum Elektrovue, ISSN 1213 – 1539,
- [14] E/mobilita: *Veřejné dobíjecí stanice ČEZ* [online]. [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <http://www.elektromobilita.cz/cs/dobijeni-na-cestach.html>
- [15] HUANG, Alex Q. Power Semiconductor Devices for Smart Grid and Renewable Energy Systems. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2017, 105(11), 2019-2047 [cit. 2019-06-01]. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2687701. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7961138/>

- [16] COSTA, Levy Ferreira, Giampaolo BUTICCHI a Marco LISERRE. Highly Efficient and Reliable SiC-Based DC–DC Converter for Smart Transformer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2017, 64(10), 8383-8392 [cit. 2019-06-01]. DOI: 10.1109/TIE.2017.2696481. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7906575/>
- [17] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>
- [18] Oenergetice.cz: *Způsoby řízení výkonových toků v přenosových soustavách* [online]. [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/zpusoby-rizeni-vykonovych-toku-v-prenosovych-soustavach>
- [19] BAYOUMI, Ehab H.E. Power electronics in smart grid distribution power systems: a review. *International Journal of Industrial Electronics and Drives* [online]. 2016, 3(1) [cit. 2019-06-04]. DOI: 10.1504/IJIED.2016.077673. ISSN 1757-3874. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=77673>