ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTRICKÝCH POHONŮ A TRAKCE

Prvky silové části energetického internetu

Bakalářská práce

Petr Smolík

Praha, Květen 2017

Bakalářský program: Elektrotechnika energetika a management

Zaměření: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Pavel Kobrle, Ph.D.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smolík** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **434861**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Prvky silové části energetického internetu

Název bakalářské práce anglicky:

The Power Part Items of Energy Internet

Pokyny pro vypracování:

1) Prostudujte problematiku tzv. energetického internetu, pokuste se sjednotit definici používaných klíčových pojmů a proveďte na toto téma stručnou a výstižnou rešerši.
2) V rešerši se zaměřte na tzv. energetický router, především na jeho známé topologie a funkci v energetickém internetu.
3) Vytvořte funkční simulační modely několika typických prvků používaných v energetickém internetu, tzv. end-users. Věnujte se hlavně jejich silovým částem.
4) Pokuste se shrnout požadavky a proveditelnost energetických routerů z hlediska jejich funkčního zařazení do energetického internetu, tj. rozhraní mezi různými typy zdrojů, spotřebičů a úložišť elektrické energie.

Seznam doporučené literatury:

[1] Heydt, G., Crow, M., The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet, DOI:
10.1109/JPROC.2010.2081330
[2] Zhang, J., Wang, W., Bhattacharya, S., Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic, In: 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 16-20, 2012
[3] Xin, L. C., Dong, Z. Y., Sun, Y. L., Hou, J. M., Liu, J. W., Design and application of energy router to realise Energy Internet,In: 10th International Conference on Advanced in Power System Control, Operation & Management, Hong Kong, November 8-12, 2015
[4] Rifkin, J., The Third Industrial Revolution, Palgrave MacMilian, 2011, ISBN 978-0-230-11521-7

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Kobrle Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce	Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

. | Datum převzetí zadání | Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Praze dne: ....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Pavlu Kobrlemu, Ph.D. za jeho cenné rady, odborné vedení a vstřícnost při konzultacích.

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje problematikou energetického internetu s důrazem kladeným na jeho hlavní součást, jíž je energetický router. Dále se zabývá požadavky kladenými na energetický router a technologiemi s ním spjatými. Práce také obsahuje matematické modely fotovoltaické a větrné elektrárny vytvořené v prostředí Simulink, které by v budoucnu měly být součástí modelu celé mikrosítě.

Abstract

This bachelor thesis describes energy internet with emphasis laid on its main part, which is the energy router. Furthermore, it deals with requirements that energy router needs to meet and with technologies connected to it. This work also contains mathematical models of photovoltaic and wind power plant created in Simulink, which could be in future implemented in a model of whole microgrid.

Obsah

1 ÚVOD 1

1.1 HLAVNÍ MYŠLENKA CHYTRÝCH SÍTÍ 1
1.2 ENERGETICKÝ INTERNET 1
1.3 FREEDM 1

2 STRUKTURA ENERGETICKÉHO INTERNETU 1

2.1 ENERGETICKÁ LOKÁLNÍ SÍŤ 2
2.2 DRUHY ENERGETICKÉ LOKÁLNÍ SÍTĚ 2
2.3 ENERGETICKÁ GLOBÁLNÍ SÍŤ – EWAN 3
Peer-to-peer – P2P *3*

3 ENERGETICKÝ ROUTER 3

3.1 POŽADAVKY 3
3.1.1 Plug and play *3*
3.2 STRUKTURA ENERGETICKÉHO ROUTERU 3
3.2.1 Modul s výkonovou elektronikou *4*
3.2.2 Komunikační modul *4*
3.2.3 GI (Grid Intelligence) modul *4*
3.3 SOLID STATE TRANSFORMER 5
3.4 RŮZNÉ NÁVRHY SST/ENERGETICKÝCH ROUTERŮ 6
3.4.1 IEM (Intelligent Energy management) *6*
3.4.2 Předběžný návrh SST *6*
3.4.3 Druhý návrh SST *6*
3.5 AC-DC HYBRID MULTIPORT ENERGY ROUTER 7
3.6 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA V SST 7

4 STAVY ELAN 8

4.1 PASIVNÍ VŮČI SÍTI 8
4.2 AKTIVNÍ VŮČI SÍTI 8
4.3 OSTROVNÍ REŽIM 8

5 MODELOVÁNÍ VÝROBY, SPOTŘEBY NĚKTERÝCH ČÁSTÍ ENERGETICKÉHO INTERNETU 8

5.1 MODELOVÁNÍ VÝROBY OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ 8
5.1.1 Modelování výroby fotovoltaické elektrárny *9*
5.2 MODELOVÁNÍ ZÁTĚŽE 9

6 AKUMULACE ENERGIE 10

6.1 SUPERKONDENZÁTORY 10
6.2 AKUMULACE ENERGIE VÝROBOU VODÍKU 11

7 PROJEKTY CHYTRÝCH SÍTÍ U NÁS A VE SVĚTĚ 12

7.1 ČESKÁ REPUBLIKA, SMART REGION - PROVOZOVATELEM JE SKUPINA ČEZ 12

7.2 NÁRODNÍ AKČNÍ PLÁN PRO CHYTRÉ SÍTĚ 12
7.3 JAPONSKO, YOKOHAMA SMART CITY PROJECT (YSCP). 12
7.4 NOVÉ MEXIKO, USA – JAPONSKO SPOLEČNÝ PROJEKT CHYTRÉ SÍTĚ 13
7.5 SET PLAN (STRATEGIC ENERGY TECHNOLOGY PLAN) 13
8 FUNKČNÍ MODELY KONEČNÝCH UŽIVATELŮ 14
8.1 MODEL FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY 14
8.1.1 Model fotovoltaického článku 14
8.1.2 MPP Tracker 17
8.2 FUNKČNÍ MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY 19
8.2.1 Model větrné turbíny 21
9 POŽADAVKY A PROVEDITELNOST ENERGETICKÝCH ROUTERŮ Z HLEDISKA JEJICH FUNKČNÍHO ZAŘAZENÍ DO ENERGETICKÉHO INTERNETU 23
9.1 POŽADAVKY NA ŘÍZENÍ TOKU ENERGIE SÍTÍ 23
9.2 POŽADAVKY NA KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ 23
9.2.1 Funkce na uživatelské úrovni 24
9.2.2 Funkce na síťové úrovni 25
9.3 POŽADAVKY NA SILOVÉ ROZHRANÍ 26
10 ZÁVĚR 27
11 ZDROJE 28

1 Úvod

1.1 Hlavní myšlenka chytrých sítí

Zvyšování cen elektrické energie a omezené množství fosilních paliv si žádá rozsáhlejší implementaci obnovitelných a jiných menších lokálních zdrojů do výroby elektrické energie. S tím ovšem dostáváme do sítě nestálé zdroje, což zvyšuje požadavky na řízení výroby a spotřeby energie. Pro efektivní řízení je třeba, aby jednotlivé části sítě (zdroje i spotřebiče) spolu mohly komunikovat. To mají na starosti energetické routery. Chytré sítě tedy používají komunikační a informační technologie pro sbírání informací o chování spotřeby a výroby v reálném čase a na základě těchto informací vylepšují efektivitu, ekonomii a spolehlivost sítě. Kromě toho mají další cíle: začlenit větším způsobem prvky akumulující elektrickou energii do sítě, zvýšit nasazení elektrických vozidel, postupně by měly zahrnovat i centralizované teplo a plynárenství.

1.2 Energetický internet

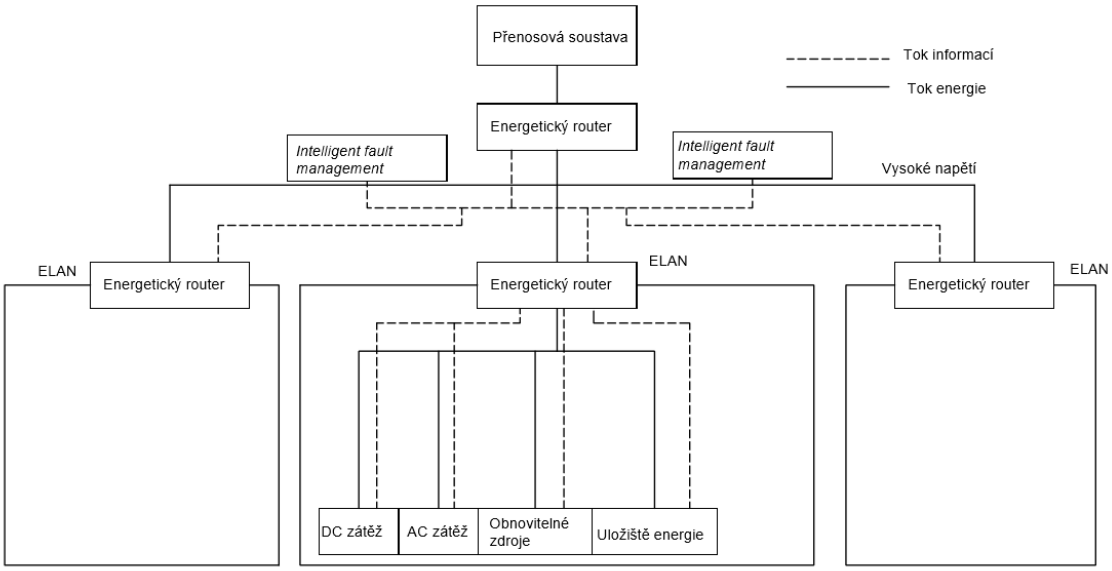
O chytré síti, která bude zajišťovat oboustranný tok informací a díky stále se zvyšujícímu počtu odběratelů, kteří se mohou stávat dočasnými dodavateli energie do sítě, i oboustranný tok energie, se dá uvažovat jako o energetickém internetu, do kterého se pomocí technologie plug-and-play připojují nestálé obnovitelné zdroje energie a zátěže.

1.3 FREEDM

Future Renewable Electric Energy Delivery and Management - FREEDM by měl být jakýsi finální stav chytrých sítí, který maximálně a efektivně využívá obnovitelné zdroje energie a má prostředky ke zlepšování kvality elektrické energie rychlou eliminací chyb v síti: např. poklesů napětí, přepětí, vyšších harmonických. [1]

2 Struktura energetického internetu

Detaily struktur energetického internetu se liší zdroj od zdroje, ovšem v zásadě mají několik společných bodů. Síť je složena z většího počtu energetických lokálních sítí (*Energy Local Area Networks – ELAN*) nebo také tzv. mikrosítí a tyto části jsou každá prostřednictvím svého energetického routeru připojeny ke zbytku sítě (*Energy Wide Area Network - EWAN*), kterou bychom mohli přirovnat ke dnešní přenosové soustavě. Struktura energetického internetu je ukázána na Obr. 1.



Obr. 1 Struktura energetického internetu

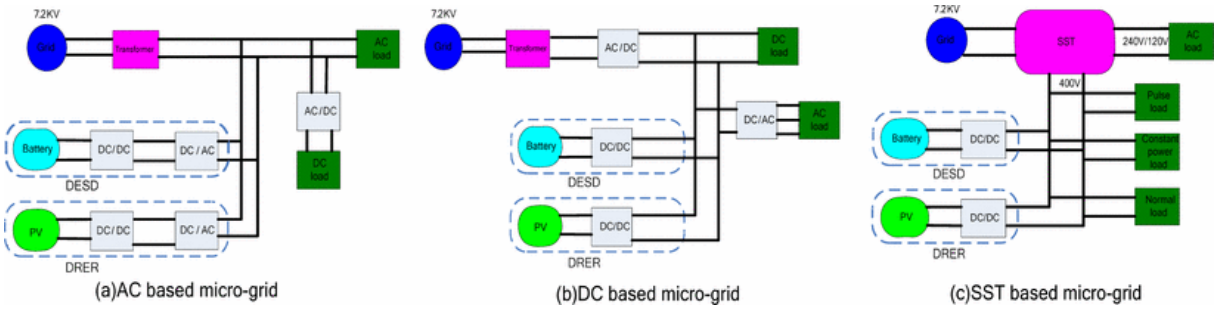
2.1 Energetická lokální síť

ELAN se skládají z konečných uživatelů (*end users*) propojených energetickým routerem nejen mezi sebou, ale také s EWAN. Jsou celkem 3 tři druhy konečných uživatelů:

- Obnovitelné zdroje elektrické energie (*Distributed Renewable Energy Resources - DRER*)
  - Fotovoltaické elektrárny
  - Větrné elektrárny
  - Vodní elektrárny
  - Geotermální elektrárny
  - Solární komín, Solární věž
- Uložiště elektrické energie (*DESD – Distributed Energy Storage Devices*)
- Zátěže
  - Stejnosměrné
  - Střídavé

2.2 Druhy energetické lokální sítě

Mohou být tři druhy mikrosítí, a to střídavé, stejnosměrné a hybridní AC/DC. Střídavé sítě vytváříme již přes sto let a jejich vlastnosti, jako je např. lehká transformace napětí, byly obrovskou výhodou pro vzdálené přenosy elektrické energie velmi vysokým napětím. S ohledem na zvyšující se počet zdrojů vyrábějících stejnosměrnou elektrickou energii, které jsou zapojeny na stranu nízkého napětí, se zároveň zvyšujícím se počtem stejnosměrných zátěží, by bylo výhodné právě tyto prvky propojit sítí stejnosměrnou. O čistě stejnosměrné síti se uvažovat nedá vzhledem k současnému stavu rozvodů, ovšem právě použití hybridních AC/DC mikrosítí by tento problém řešilo [4]. Různé druhy mikrosítí jsou zachyceny na Obr. 2.



Obr. 2 Druhy mikrosítí

2.3 Energetická globální síť – EWAN

EWAN není nic jiného než spojení více mikrosítí dohromady. Jednotlivé mikrosítě, připojené skrze energetické routery, jsou obdobou počítačové peer-to-peer sítě.

Peer-to-peer – P2P

P2P je opakem sítě klient-server, kde spolu uživatelé komunikují skrze jednu centrální jednotku - server. U P2P je každý spojen s každým, všichni uživatelé jsou rovnocenní a mají stejné možnosti. Každý uživatel zde může zahájit komunikační relaci.

3 Energetický router

3.1 Požadavky

Energetický router se má připojit na střídavou vysokonapěťovou stranu distribuční sítě a má poskytovat stejnosměrnou nebo střídavou sběrnici na straně nízkého napětí či obě sběrnice najednou.
Dále musí energetický router umožňovat oboustranný tok energie, aby energie z DRER mohla být prodávána do sítě.
Energetický router by měl mít umožněno napájení jak ze strany vysokého, tak i nízkého napětí.
Energetický router by měl mít vícenásobné plug and play (3.1.1) rozhraní se stejnosměrnou i střídavou sběrnicí, skrze které koneční uživatelé, spojení s energetickým internetem, mohou být okamžitě (v reálném čase) rozpoznáni a začít mezi sebou i s energetickým routerem automaticky komunikovat.
Energetický router má být vybaven operačním systémem, který zajišťuje komunikaci s ostatními energetickými routery, řízení plug-and-play rozhraní, řízení rovnováhy výroby a spotřeby v ELAN, detekci chyb, a společně s ostatními routery i řízení optimálního využívání energie. [2][3][6]

3.1.1 Plug and play

Plug and play je počítačová technologie, která usnadňuje detekci a připojení nové hardwarové komponenty bez nutnosti zásahu uživatele či nějaké další fyzické konfigurace.

3.2 Struktura energetického routeru

Detaily struktur energetických routerů se liší zdroj od zdroje, ovšem všechny mají jako hlavní část tzv. *solid state transformer* (SST). SST je pak řízen operačním systémem na základě dat, která získává jak

z mikrosítě, ke které je připojen, tak ze zbytku sítě (prostřednictvím Wi-Fi, Zigbee, Ethernet, 3G apod.). Na Obr. 3 je příklad struktury energetického routeru. Ta se skládá ze tří modulů

3.2.1 Modul s výkonovou elektronikou

Hlavní funkcí tohoto modulu je snížit napětí z napětí přenosové soustavy na požadovanou hodnotu napětí dané mikrosítě. Toho docílí sérií transformací např. Z 7.2 kV AC na 10 kV DC, poté z 10 kV DC na 400 V DC a nakonec ze 400 V DC na 120 V AC.

3.2.2 Komunikační modul

Komunikační modul energetického routeru se skládá ze dvou komponent. Jeden slouží pro vnitřní a druhý pro vnější komunikaci. Vnitřní komunikace zahrnuje komunikaci mezi ovládáním SST a každým elektrickým portem. Komponenta pro vnější komunikaci zajišťuje spojení každého energetického routeru s infrastrukturou pro komunikaci v celé síti, tedy mezi všemi energetickými routery.

3.2.3 GI (*Grid Intelligence)* modul

Tento modul je přímo spojený s ovládáním SST. Sbírá data o stavu energetického routeru a celé sítě z komunikačního modulu, zajišťuje optimalizaci výroby a spotřeby elektrické energie, a to jak uvnitř mikrosítě, tak i mezi mikrosítěmi. Rozhodnutí tohoto modulu jsou poté poslána do bloku *Power Quality Management,* který změní konfiguraci SST, aby odpovídala požadovanému stavu. Typickým příkladem takovéto změny je aktivace portu pro připojení konečného uživatele.

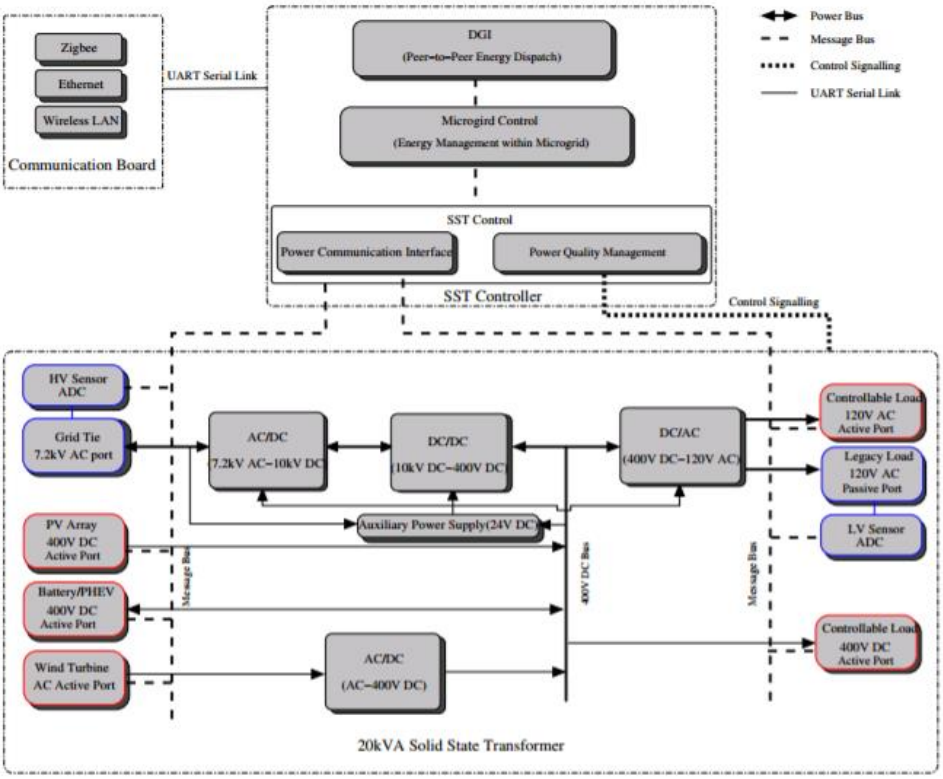


Fig. 1. The architectural design of an energy router based on a 20 kVA solid state transformer.

Obr. 3 Struktura energetického routeru

3.3 Solid state transformer

Hlavní myšlenka SST je patrná již z jeho schématu (Obr. 4). Na straně vysokého napětí si vytvoří vysokou frekvenci pomocí usměrňovače a střídače, poté transformátorem, který vzhledem k pracovní frekvenci může mít mnohem menší rozměry než běžný distribuční transformátor, sníží napětí, které poté usměrní, a opět následně rozstřídá na požadovanou frekvenci.

Pro představu, kolikrát se sníží rozměry VF transformátoru s pracovní frekvencí 10kHz oproti obyčejnému distribučnímu transformátoru s pracovní frekvencí 50 Hz:

- Vycházíme z transformátorové rovnice pro efektivní hodnotu indukovaného napětí

$$U_{ief} = 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N = 4,44 \cdot B \cdot S \cdot f \cdot N \tag{1}$$

ϕ Magnetický tok
f Frekvence
N Počet závitů
B Magnetická indukce
S Průřez jádra magnetického obvodu

- Magnetický tok závisí na magnetické indukci a průřezu magnetického obvodu transformátoru.

Pro transformátory na síťovou frekvenci se používají na magnetické obvody FeSi plechy, tedy železné plechy s příměsí křemíku, jejichž sytná indukce je kolem 2T, zatímco magnetický obvod transformátorů pro vysoké frekvence je vytvořen ferity, jejichž sytná indukce je zpravidla pod 0,5T, tudíž čtyřikrát menší.

- Pracovní frekvence VF transformátoru je dvěstěkrát větší než pracovní frekvence distribučního transformátoru.
- Průřez magnetického obvodu tak teoreticky může být pro frekvenci 10kHz 50krát menší než pro frekvenci síťovou.
- Snížení rozměrů transformátoru je důležité, jelikož to významně snižuje jeho pořizovací cenu.

SST má tedy v sobě dva stejnosměrné napěťové meziobvody, schopné eliminovat krátkodobé napěťové poklesy, které mohou přijít ze strany vysokého napětí. Stejnosměrný obvod na straně nízkého napětí může sloužit k připojení obnovitelných zdrojů elektrické energie, které právě vyrábějí, i k připojení stejnosměrné zátěže. [4]

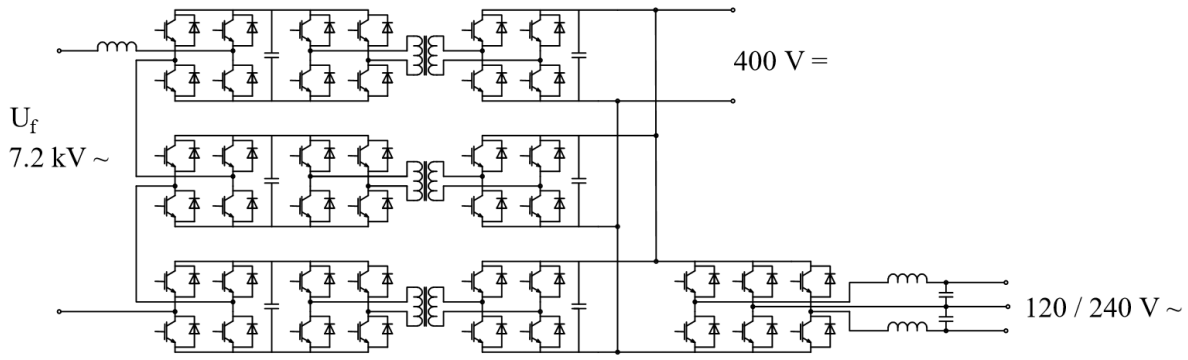
3.4 Různé návrhy SST/Energetických routerů

3.4.1 IEM (*Intelligent Energy management*)

[1] Autoři mají zaměření na výkonovou elektroniku a její využití pro obnovitelné zdroje. Tento energetický router, který zde nazývají také jako IEM, se skládá z jimi navrhovaného SST a vyvíjeného softwaru DGI [17], spojených komunikačním rozhraním.

3.4.2 Předběžný návrh SST

Jedná se o jednofázový SST s použitými křemíkovými IGBT 6 kV, 25A zapojených do série (Obr. 4).

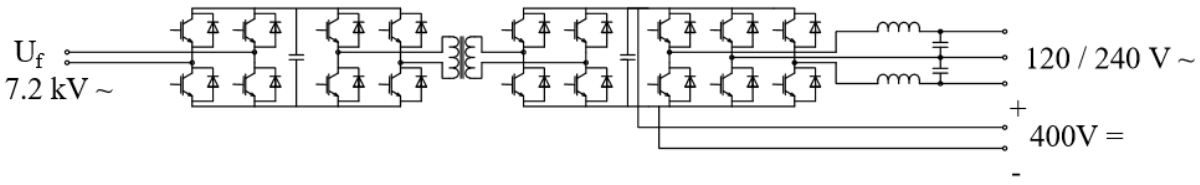


Obr. 4 Topologie SST při použití křemíkových součástek

3.4.3 Druhý návrh SST

Jednofázový SST, ve kterém jsou použity SiC MOSFET 15 kV na straně vysokého napětí, se třemi porty o různých napětích: 7,2 kV AC, 120/240 V AC a 400 V DC. Transformátor potřebný pro tento

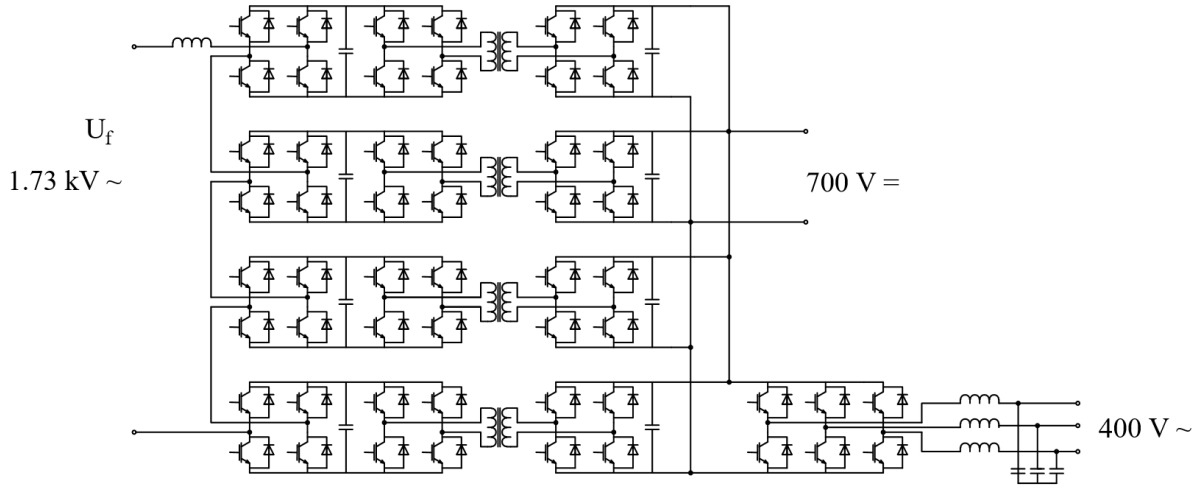
návrh bude pracovat na frekvenci 10 kHz, v budoucnosti se však počítá, že technologie SiC umožní spínání výkonových součástek s frekvencí až 50 kHz (článek byl publikován v roce 2010). Změna pracovní frekvence například z 60 Hz na 20 kHz pro distribuční transformátor znamená výrazné zmenšení rozměrů a hmotnosti.



Obr. 5 Topologie SST při použití SiC součástek

3.5 AC-DC hybrid multiport energy router

[10] Autoři mají zaměření na vysokonapěťové měniče. V tomto článku navrhují energetický router se SST, který má na straně vysokého napětí port na střídavé napětí 3 kV (sdruženého) a na straně nízkého napětí porty na 380 V střídavého napětí a 700 V stejnosměrného napětí. Strany nízkého a vysokého napětí jsou od sebe odděleny transformátorem s pracovní frekvencí 12 kHz. Nominální výkon, který by tento SST měl přenášet, je 100 kVA.



Obr. 6 SST s hodnotami napětí vhodné pro použití u nás

K výstavbě takovéhoto SST se dají použít levné křemíkové IGBT 1,2 kV. Aby mohlo zařízení pracovat s vyšším napětím, musí být jednotlivé buňky měniče (H-můstky), které jsou stavěné na nižší napětí, zapojeny do kaskád.

3.6 Výkonová elektronika v SST

Křemíkové IGBT, které mohou být použity v měniči vysokonapěťové části SST, by nemusely toto napětí vydržet. To se dá vyřešit buďto sériovým zapojením několika modulů střídač/usměrňovač

(víceúrovňová topologie- Obr. 4) nebo použitím součástek z karbidu křemíku Obr. 5 např. 15kV SiC MOSFET, který vydrží vyšší napětí a zároveň má nižší spínací a rozpínací ztráty. Jeho výroba je ovšem dražší než výroba křemíkových součástek, a to hlavně z toho důvodu, že výroba křemíkových součástek má za sebou dlouhý vývoj.[6]

4 Stavy ELAN

4.1 Pasivní vůči síti

Pasivní vůči síti: V tomto případě jsou obnovitelné zdroje elektrické energie (DRER) a úložiště (DESD) elektrické energie připojené na stejnosměrný meziobvod nízkého napětí SST. DRER poskytují dostatek energie pro pokrytí stejnosměrné zátěže, DESD vyrovnává rozdíly mezi zátěží a výrobou (vybíjí se nebo se nabíjí). Střídavá zátěž se ovšem napájí z SST, tedy ze strany vysokého napětí

4.2 Aktivní vůči síti

V tomto případě nelze vyrovnat energii DRER a DESD se stejnosměrnou zátěží a je třeba, aby SST dodal nebo naopak odebíral energii.

4.3 Ostrovní režim

V obou předchozích režimech byl připojen SST na straně vysokého napětí k síti. Pokud dojde v síti VN k nějaké poruše, může být SST „odříznut“ od sítě. V takovém případě DRER pokrývají spotřebu stejnosměrné i střídavé zátěže za pomoci DESD, která opět vyrovnává výrobu a spotřebu a také drží napětí ve stejnosměrném meziobvodu.
V ostrovním režimu se může stát, že DRER a DESD nedokáží dohromady pokrýt spotřebu celé zátěže, v takovém případě se budou napájet pouze kriticky důležité zátěže.

5 Modelování výroby, spotřeby některých částí energetického internetu

Proměnnost a nejistota v oblasti výroby a spotřeby energie je jednou z dalších překážek, kterým musí energetický internet čelit. Proto je dobré vytvářet modely možných situací, díky nimž je pak možné vybavit energetický internet technologiemi, které tyto situace dokáží zvládnout. [2] se zabývá modelováním typických konečných uživatelů, kteří se objevují v každé mikrosíti.

5.1 Modelování výroby obnovitelných zdrojů

Obnovitelný zdroj bude reprezentován funkcí $R(t)$, kterou získáme proložením výsledků několikanásobného měření výkonu dodávaného daným obnovitelným zdrojem.

5.1.1 Modelování výroby fotovoltaické elektrárny

Měření fotovoltaických panelů na střeše FREEDM System center během jednoho měsíce [2]. Měření probíhalo každý den v časových intervalech pěti minut. Na Obr. 7 jsou tři grafy výsledných hodnot a jejich možné prokládání. Vzniklé funkce jsou důležitou informací, kterou by energetický router mohl použít pro vytváření modelů jednotlivých solárních elektráren v mikrosíti.

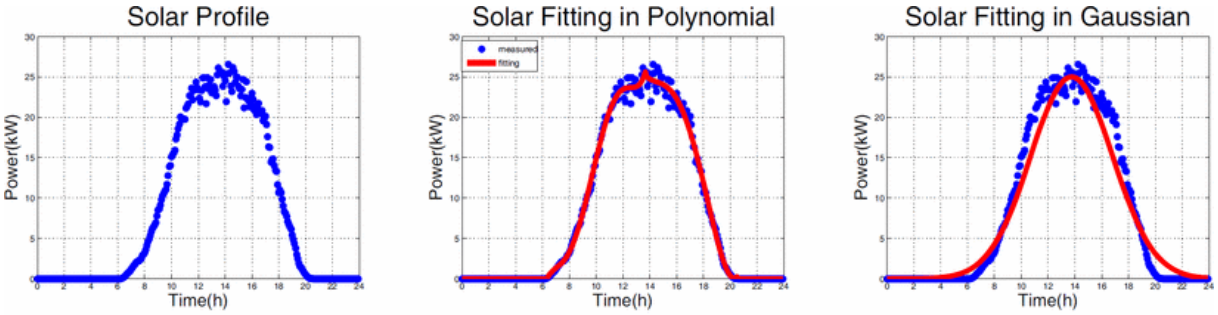
(a) Bez proložení

(b) Proložení polynomem

$$R(t) = \begin{cases} 0 & 0 \le t \le 6,617 \\ 0,00211t^5 - 1,0329t^4 + 19,659t^3 - 181,7557t^2 + 8194919t - 1447,3 & 6,617 \le t \le 13,75 \\ 0,0585t^4 - 38362t^3 + 93,0761t^2 + 993,3217t + 3968,1 & 13,75 \le t \le 20,58 \\ 0 & 20,58 \le t \le 24 \end{cases}$$

(c) Proložení Gaussovou křivkou

$$R(t) = 25e^{\frac{-(t-13,76)^2}{3,06^2}}$$



(a) (b) (c)

Obr. 7 Výsledky měření výkonu fotovoltaických panelů

a) Pouze naměřená data

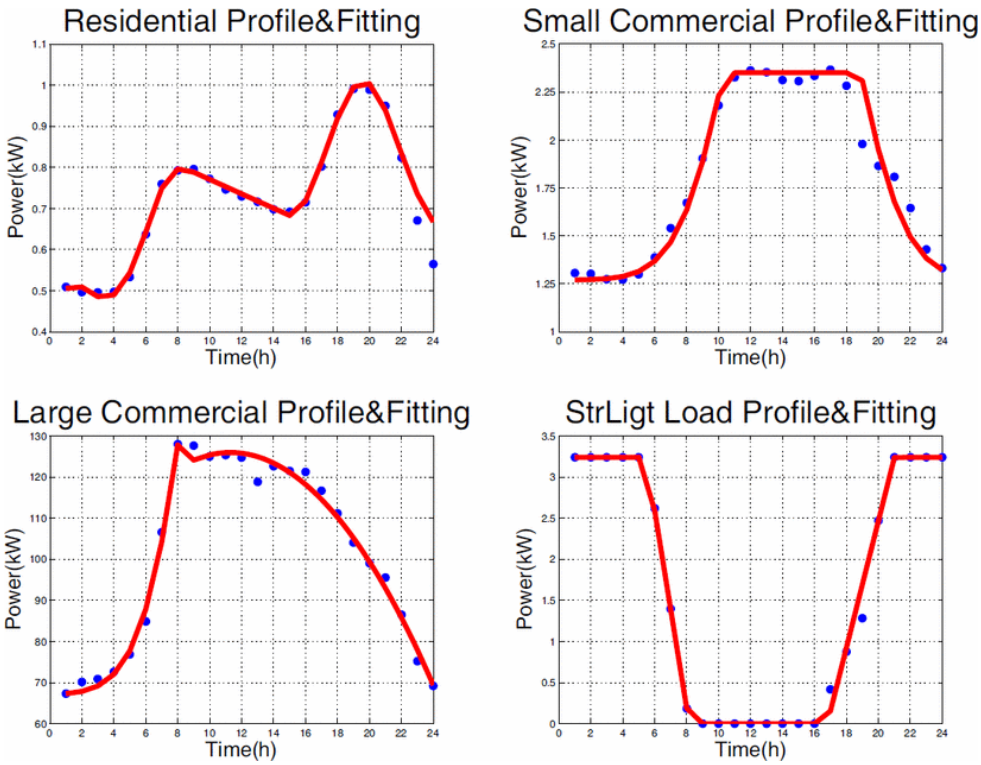
b) Proložení polynomem

c) Proložení Gaussovou křivkou

5.2 Modelování zátěže

Zátěž bude representována funkcí $L(t)$, kterou získáme proložením výsledků několikanásobného měření různé spotřeby.

Příklad: Denní diagram zatížení čtyř různých typů odběratelů, naměřeny naměřeno během doby 21 měsíců firmou NHEC.



Obr. 8 Modelování různých zátěží

6 Akumulace energie

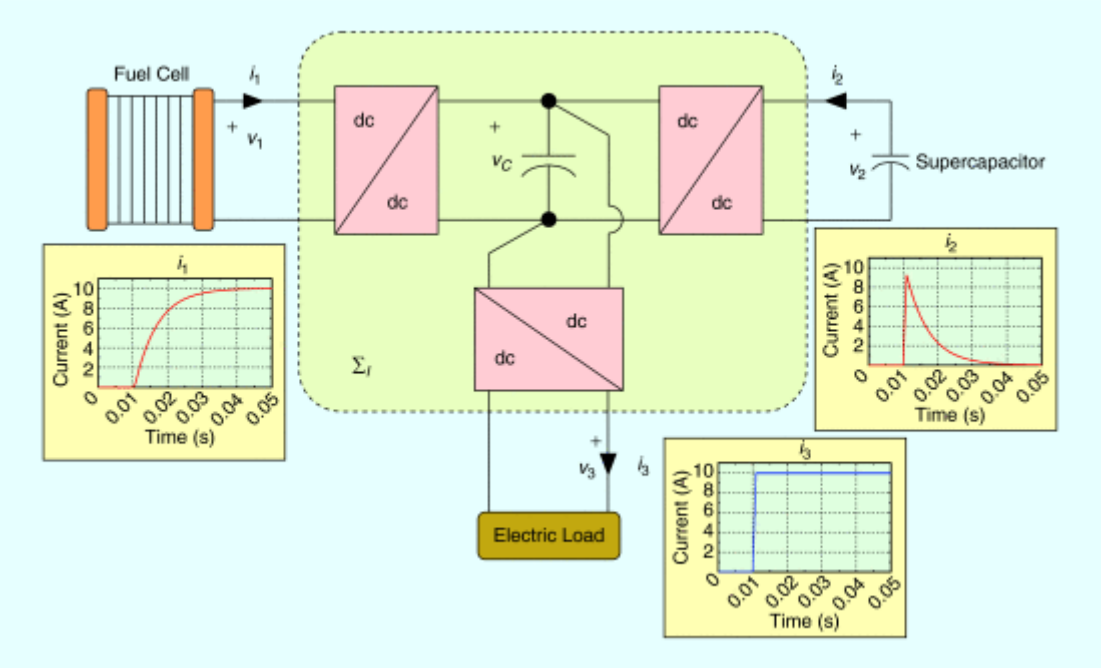
Pro energetický internet je akumulace energie velice důležitá, umožňuje nejen vyrovnávání výkyvů výroby obnovitelných zdrojů, ale také ostrovní chod jednotlivých mikrosítí při poruše. Skladování elektrické energie je prakticky nemožné, ovšem historicky se k její akumulaci používalo přeměny na jiný druh energie

- **Mechanická energie**:
    1. **Potenciální**: Příkladem jsou přečerpávací elektrárny, jejichž účinnost se u těch novějších pohybuje kolem 75 %. Jejich kapacita závisí na objemu vody v horní nádrži, výkony jsou různé. Např. přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně má instalovaný výkon 2×325 MW. Náběhy přečerpávacích elektráren pro dodávání/odebírání energie ze sítě jsou v řádech jednotek minut.
    2. **Tlaková**: Stlačený vzduch
    3. **Kinetická**: Setrvačníky
- **Chemická energie:** Pro ukládání chemické energie se používají různé druhy akumulátorů (NaS, Pb, …), nebo také palivové články, v nichž se většinou používá jako palivo vodík.
- **Tepelná energie**

6.1 Superkondenzátory

Další možností akumulace je použití superkondenzátorů, které jsou na rozdíl od běžných akumulátorů schopny rychle se nabít a okamžitě dodat plný výkon. Nemají sice tak velkou kapacitu, ovšem například u elektromobilů postačují k uchování brzdné energie automobilu, kterou by tak rychle běžný akumulátor nebyl schopen pojmout, a následně tuto energii využít pro rozjezd. Na obrázku je systém

s palivovým článkem, superkondenzátorem a zátěží. Ve chvíli kdy se zátěž zvýší, nestíhá palivový článek tak rychle reagovat na měnící se požadavek na proud do zátěže, a tak rozdíl požadovaného proudu a proudu dodávaného palivovým článkem dodává superkondenzátor. Vše by samozřejmě muselo být řízeno a monitorováno, třeba právě energetickým routerem, aby systém v každou chvíli věděl, kde a kolik má naakumulováno energie a znal tak v každém okamžiku stav jemu podřízené mikrosítě.



Obr. 9 Použití superkondenzátoru v síti

6.2 Akumulace energie výrobou vodíku

Jednou z dalších možností uchovávání elektrické energie je její použití k výrobě vodíku a následná zpětná přeměna. Běžný chytrý dům je vybaven fotovoltaickým panelem. Tím ale získává energii jen ve špičce slunečního svitu, nikoliv však večer, což je právě doba, kdy v mnoha případech dochází ke špičkovým odběrům. V případě, že je vyráběné množství elektrické energie větší než aktuální spotřeba, může být přebytečný výkon fotovoltaických panelů buďto prodáván do sítě, nebo je přebytečný výkon ukládán v olověných akumulátorech. Pokud jsou plně nabity, nebo výkon, který je potřeba uložit, překračuje maximální nabíjecí proud, je přebytečný výkon využíván v elektrolyzéru k výrobě vodíku. Vodík je následně skladován v tlakové nádrži. V období, kdy je okamžitá spotřeba domácnosti vyšší než výkon fotovoltaického systému, je krátkodobě spotřeba pokryta z akumulátorů, v případě delšího nedostatku je skladovaný vodík zpětně přeměňován na elektrickou energii v palivovém článku.

7 Projekty chytrých sítí u nás a ve světě

7.1 Česká republika, Smart region - provozovatelem je skupina ČEZ

Pro testování inteligentních sítí vybrala Skupina ČEZ mikroregion Vrchlabí. Dlouhodobý projekt zvaný Smart Region zaváděl a testoval prvky Smart Grids v období let 2010–2015. Vrchlabí bylo zvoleno proto, že má pro záměry zkušebního projektu vhodnou velikost, existují zde zapojitelné obnovitelné zdroje energie i možnost vybudování několika jednotek kombinované výroby elektřiny a tepla. Současně je Vrchlabí v blízkosti Krkonošského národního parku ideální z hlediska ekologických přínosů projektu. V neposlední řadě mohl projekt vzniknout díky podpoře a vstřícností vedení města. Projekt zahrnuje dvě lokality – Liščí Kopec s 1900 odběrnými místy a území města Vrchlabí s 3000 odběrnými místy. Základní cíle projektu jsou automatizace sítí VN i NN a také umožnění ostrovního provozu 1880 odběrných míst v městské části Vrchlabí s minimálním zatížením 360 kW a maximálním 1,27 MW, které jsou napájeny z kogenerační jednotky o jmenovitém výkonu 1,6 MW.[12]

7.2 Národní akční plán pro chytré sítě

Vypracováno ministerstvem průmyslu obchodu České republiky [13]. V roce 2015 byl schválen vládou. Plán se v současnosti vztahuje na období do roku 2019, avšak obsahuje i dlouhodobý výhled až do roku 2040. Plán počítal mimo jiné se zjednodušením připojování malých zdrojů do ES (elektrizační soustavy), čímž ji začíná připravovat na decentralizaci výroby.

7.3 Japonsko, Yokohama Smart City Project (YSCP).

Projekt byl spuštěn v roce 2010 a snaží se o aplikaci chytrých sítí pro 4000 domácností a komerčních budov a tím nejen o snížení celkové spotřeby a špičkového odběru elektrické energie, ale také o snížení emisí CO2 o 16 % do roku 2020. Město také poskytlo 2000 elektromobilů a 27 nabíjecích stanic, které by měly být napájeny s pomocí obnovitelných zdrojů. [18]

7.4 Nové Mexiko, USA – Japonsko společný projekt chytré sítě

Projekt byl uplatněn na ve dvou lokalitách Los Alamos a Albuquerque. Systém chytré sítě v Albuquerque je řízen pomocí *Micro Energy Management Systém* (µEMS), který má jako hlavní funkce:

a) Předpovídat poptávku a výkon fotovoltaických elektráren
b) Řízení energie obnovitelných zdrojů hybridním řízením baterií
c) Vytvářet plány poptávky
d) Vyvažovat výrobu a spotřebu
e) Koordinaci s vyšším systémem

µEMS má na starosti mikrosíť obsahující: 1600 domácností, fotovoltaické elektrárny (1MW), energetické úložiště (NAS baterie – 1MW/6MWh, Pb baterie - 0.8MW/2,3MWh) a chytrý dům společnosti NEDO, která dohlíží na celý projekt. S využitím baterií je tok výkonu téměř konstantní, zatímco bez nich má tok špičkové hodnoty. Změna toku výkonu je patrná z Obr. 10

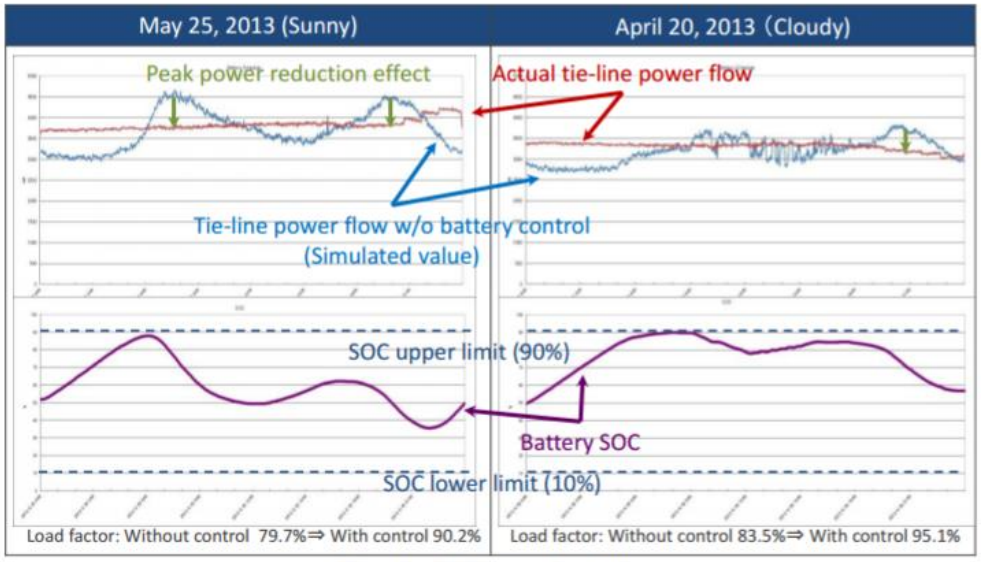


Figure 4 µEMS demonstration results

Obr. 10 Změny toku výkonu

Zároveň se ukázalo, že fotovoltaické elektrárny v oblasti pokrývají při vysoké zátěži až 20% spotřeby a při nízké dokonce 50%.

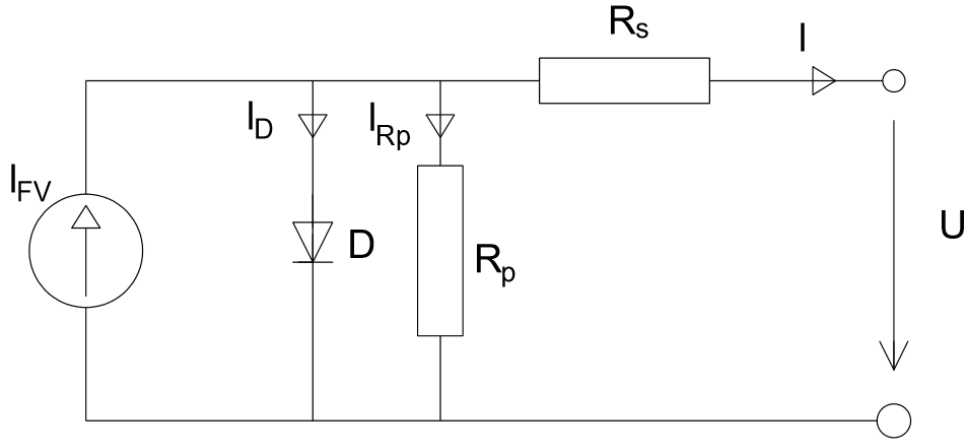
7.5 SET plan (Strategic energy technology plan)

Podnět EU, jehož cílem je splnit závazek o snížení emisí CO_2 do roku 2020 o 20 % oproti stavu v roce 1990 a zvýšení podílu obnovitelných zdrojů ve výrobě elektrické energie. Jednou z možností, jak tento závazek splnit, je přeměnit evropskou energetickou síť na chytrou síť. V rámci tohoto plánu vznikla EEGI (*European Electricity Grid Initiative*), iniciativa zaměřující se na demonstrační projekty chytrých sítí, jedním z těchto projektů je právě Smart region ve Vrchlabí, jelikož skupina ČEZ je jedním ze zástupců distributorů této iniciativy.

8 Funkční modely konečných uživatelů

8.1 Model fotovoltaické elektrárny

8.1.1 Model fotovoltaického článku



Obr. 11 Náhradní schéma fotovoltaického článku

Proud diodou D, která představuje P-N přechod fotovoltaického článku, je dán její V-A charakteristikou která je popsaná Shockleyho rovnicí

$$I_D = I_S\left(\exp\left[\frac{qU_D}{kT}\right]-1\right) \tag{2}$$

I_D Proud diodou D

I_S Saturační proud

q Elementární náboj rovný 1,6 $\cdot 10^{-19}$ C

k Boltzmannova konstanta rovna 1,38 $\cdot 10^{-23}$ J$\cdot$K^{-1}

T Teplota diody

U_D ..... Napětí na diodě D

Podle Kirchhoffova zákona o proudech můžeme napsat

$$I = I_{FV} - I_S\left(\exp\left[\frac{q(U-IR_S)}{kTA}\right]-1\right)-\frac{(U-IR_S)}{R_{SH}} \tag{3}$$

I_{FV} Proud generovaný fotoelektrickým jevem (fotoproud)

U Výstupní napětí fotoelektrického článku

A Faktor ideálnosti (A=1.1 [20]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**)

Fotoproud závisí z velké části na intenzitě záření a na teplotě při které fotoelektrický článek pracuje

$$I_{FV} = \frac{I_1}{I_r}\left(I_{SC} + K_I(T_1 - T_r)\right) \tag{4}$$

I_{SC} Proud nakrátko fotovoltaického článku při referenční teplotě

I_r Referenční intenzita záření (I_r =1000 W·m^{-2})

T_r Referenční teplota (T_r =25 °C)

K_I Teplotní koeficient proudu nakrátko (K_I =0,0017 $A{\cdot}K^{-1}$ [20])

T_1, I_1 Teplota článku a Intenzita záření působící na článek

Saturační proud P-N přechodu fotovoltaického článku je dán rovnicí

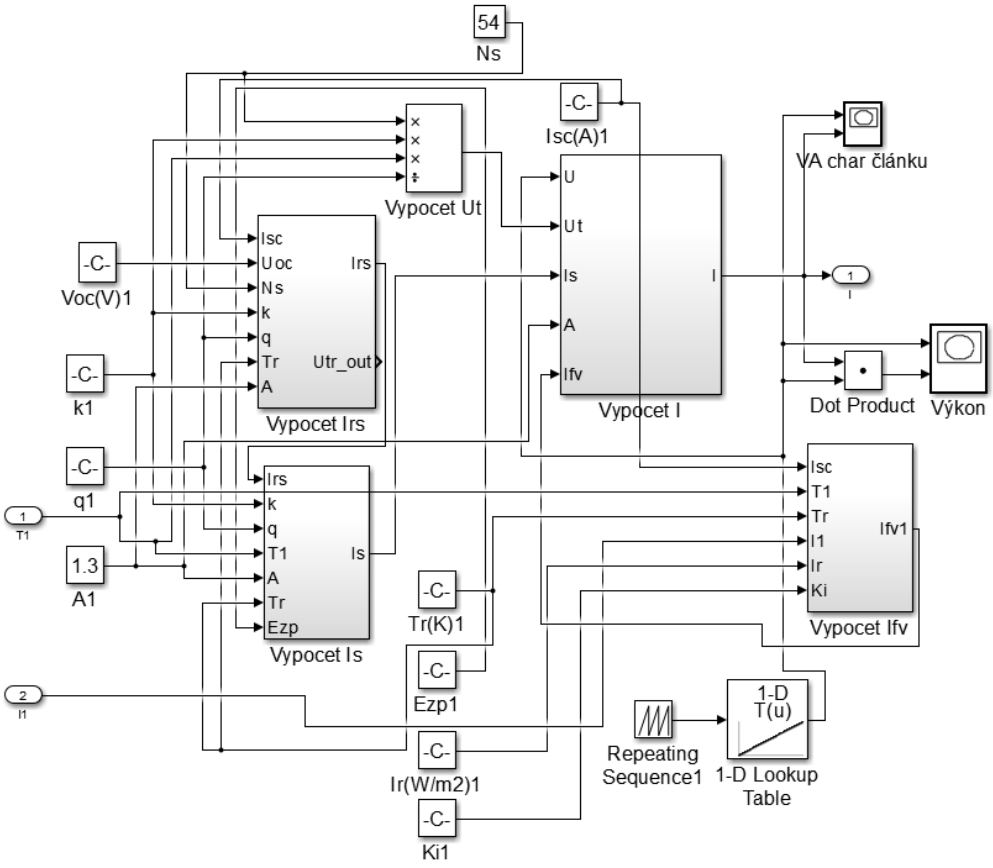
$$I_S = I_{RS}\left(\frac{T_1}{T_r}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{qE_{zp}}{Ak}\cdot\left(\frac{1}{T_r}-\frac{1}{T_1}\right)\right] \tag{5}$$

E_{zp} Šířka zakázaného pásu, pro křemík E_{zp} =1,1 eV

I_{RS} Závěrný saturační proud

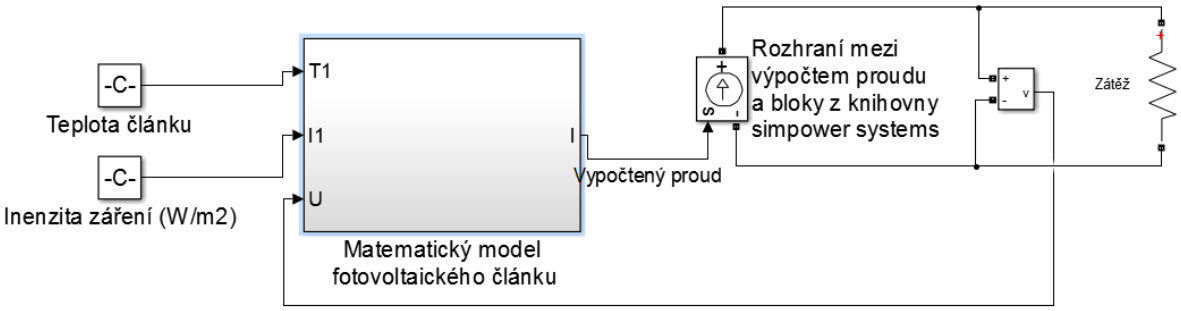
$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{\exp\left(\frac{qU_{OC}}{AkT_1}\right)-1} \tag{6}$$

U_{OC} Napětí naprázdno fotovoltaického článku při referenční teplotě



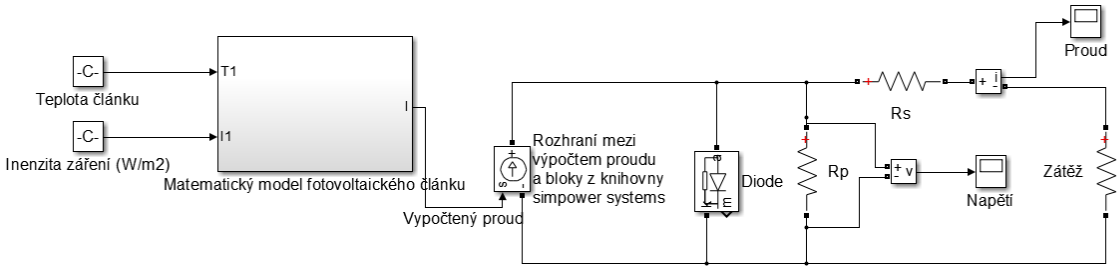
Obr. 12 Rovnice (3)(4)(5) *a (6) vložené do Simulinku*

Model na Obr. 12 má dva vstupy, teplotu článku a intenzitu záření. Jeho hlavní částí jsou 4 subsystémy, které počítají rovnice (3),(4),(5) a (6). Pro zobrazení VA charakteristiky je napětí potřebné pro výpočet proudu přiváděno z tabulky hodnot. Vypočtená hodnota proudu je poté přivedena do bloku *programmable current source*, který převede vypočtenou hodnotu proudu na signál, který dokáží zpracovat bloky *Simscape Power Systems*.



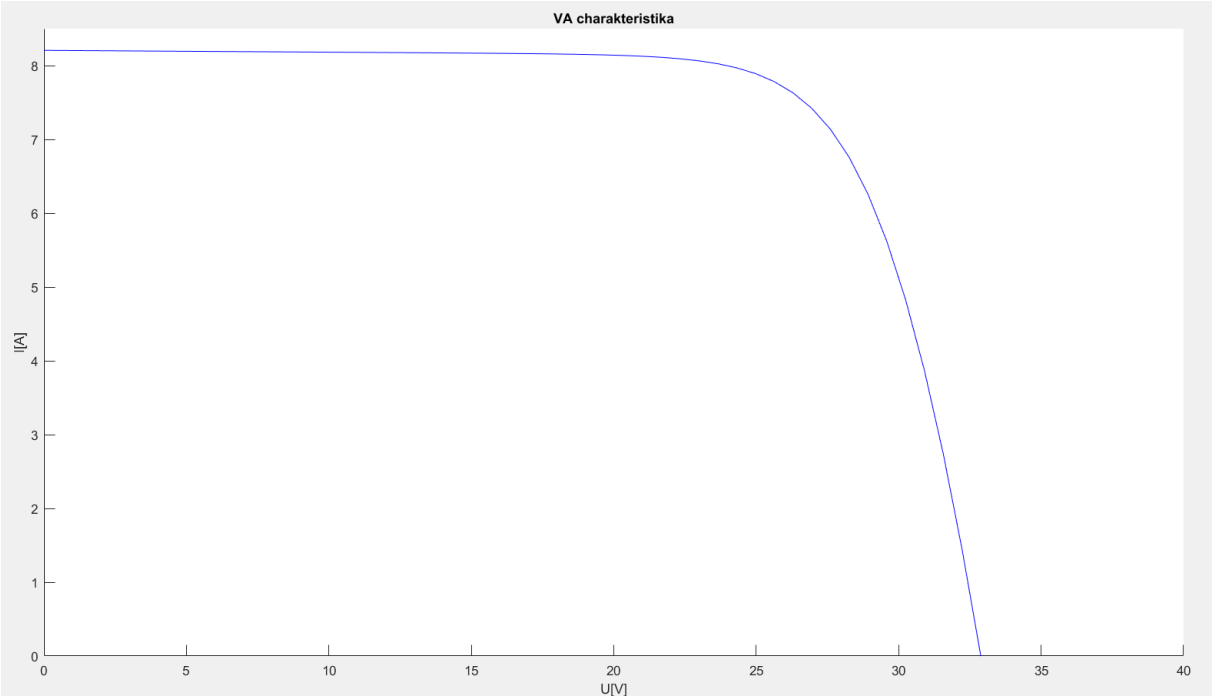
Obr. 13 Převedení vypočteného proudu do elektrického schématu.

Takto vytvořený model by se ovšem jevil v elektrickém schématu jako zdroj proudu. Proto je třeba změnit hodnotu vypočteného proudu, která jde do bloku *programmable current source* pouze na hodnotu I_{FV}, a upravit elektrické schéma aby odpovídalo náhradnímu schématu fotovoltaického článku.



Obr. 14 Model fotovoltaického článku.

Takto vytvořené fotovoltaické články se poté dají skládat serio-paralelně do fotovoltaických modulů, které pak tvoří fotovoltaickou elektrárnu.

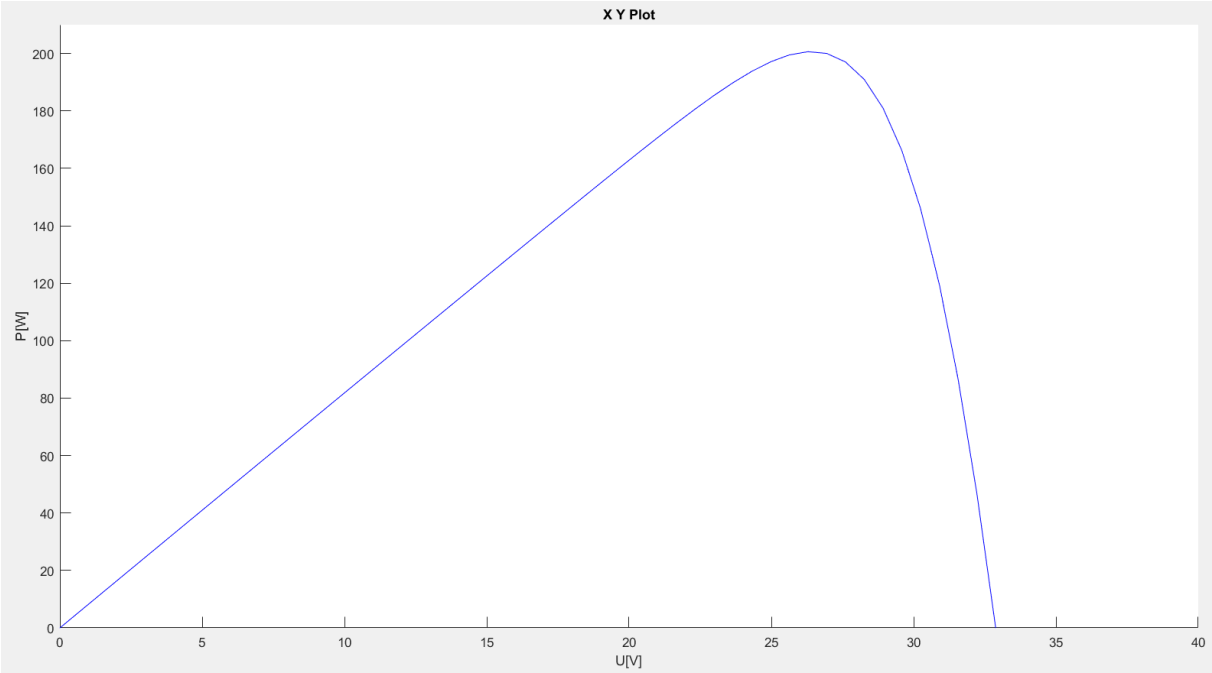


Obr. 15 VA charakteristika fotovoltaického článku

Každá fotovoltaická elektrárna pak musí být spojena se sítí pomocí měniče. V současnosti se používají invertory pro připojení do stávajících střídavých sítí, ovšem s použitím energetického routeru nám stačí DC/DC měnič. Dále by měla každá fotovoltaická elektrárna obsahovat MPP tracker.

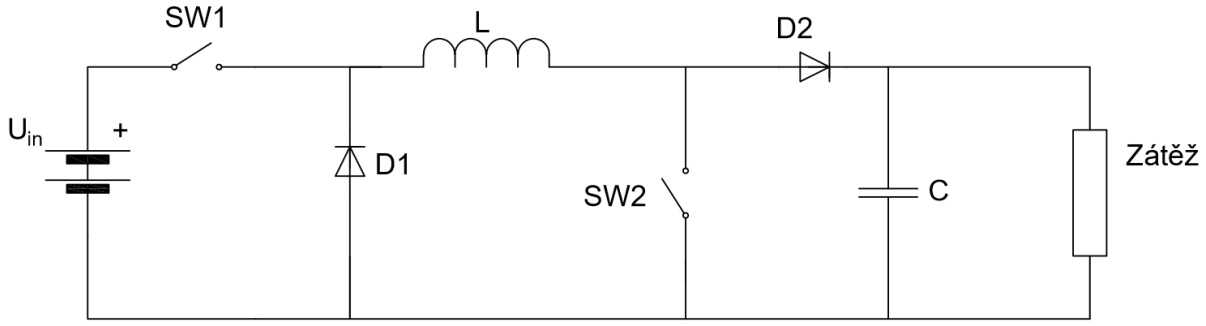
8.1.2 MPP Tracker

MPPT je technika, zajišťující maximální možný výkon fotovoltaického pole, při dané intenzitě záření. Na Obr. 16 je křivka průběh výkonu v závislosti na napětí. Na křivce výkonu vidíme maximum, kterému se říká bod maximálního výkonu (MPP – *Maximum power point*). To je bod, ve kterém bychom chtěli, aby fotovoltaický modul operoval a dodával nám tak maximální možný výkon.



Obr. 16 Závislost výkonu na napětí a bod maximálního výkonu.

Ovšem pracovní bod na VA charakteristice je určen zátěží, kterou má fotovoltaický modul na svém výstupu. MPP tracker tedy musí přinutit modul pracovat v bodě VA charakteristiky, která odpovídá MPP. Nejjednodušším způsobem, jak toho docílit, je regulovat napětí modulu, aby korespondovalo s napětím v MPP. To zajišťuje DC/DC měnič (př. Buck/Boost DC-DC měnič Obr. 17), který dokáže stejnosměrné napětí jak zvyšovat, tak i snižovat.



Obr. 17 Buck/Boost DC-DC měnič

Při jakékoliv změně parametrů VA charakteristiky (intenzita záření, teplota) se ovšem změní MPP, a proto je třeba opět doregulovat napětí modulu, aby korespondovalo s napětím v MPP. Existuje několik metod nalézání MPP – *MPP tracking*.

8.1.2.1 MPPT - Částečné napětí naprázdno

Tato metoda nepřímého MPPT využívá toho, že dobrá aproximace napětí v bodě maximálního výkonu je dána jednoduchou rovnicí.

$$U_{mpp} = k \cdot U_{oc} \tag{7}$$

U_{oc} napětí naprázdno

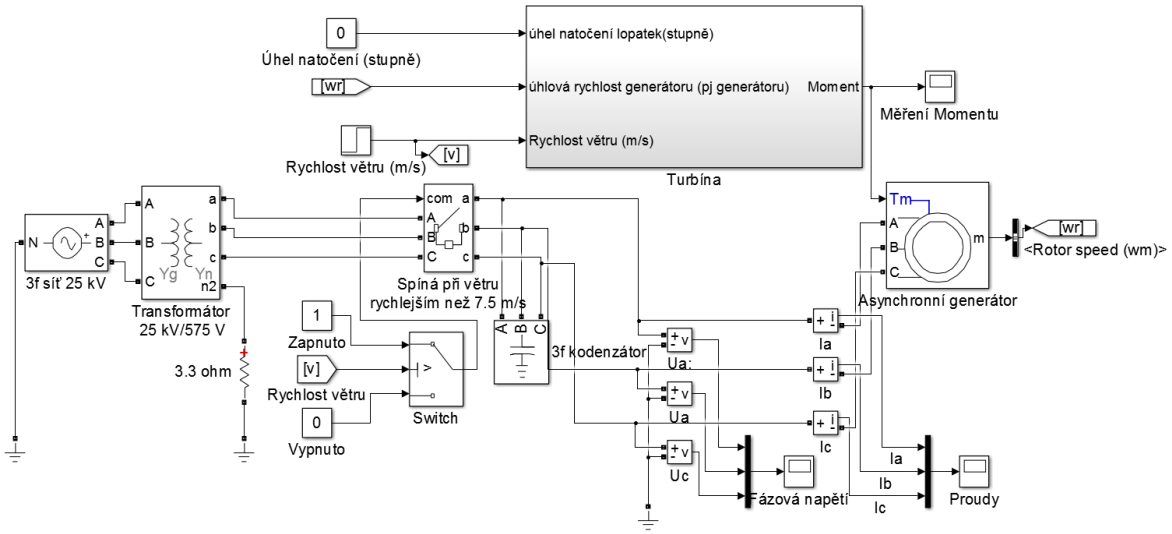
k konstanta závislá na použitém materiálu článku, pro krystalický křemík je v rozsahu 0,7-0,8.

Touto metodou je téměř nemožné sledovat přesně polohu MPP, pouze zaručuje práci v jeho okolí. Výhodou této metody je její jednoduchost a tedy i cena potřebného hardwaru k jejímu použití.

8.1.2.2 MPPT – *Pertrub and observe*

Při této metodě jsou postupně prováděny drobně změny napětí a sleduje se, jaký to má dopad na výkon. Pokud zvýšení napětí vede ke zvýšení výkonu, pak víme, že jsme na křivce výkonu nalevo od MPP a následuje opětné zvýšení napětí. Pokud při zvýšení napětí dojde ke snížení výkonu, pak víme, že se nacházíme napravo od MPP.

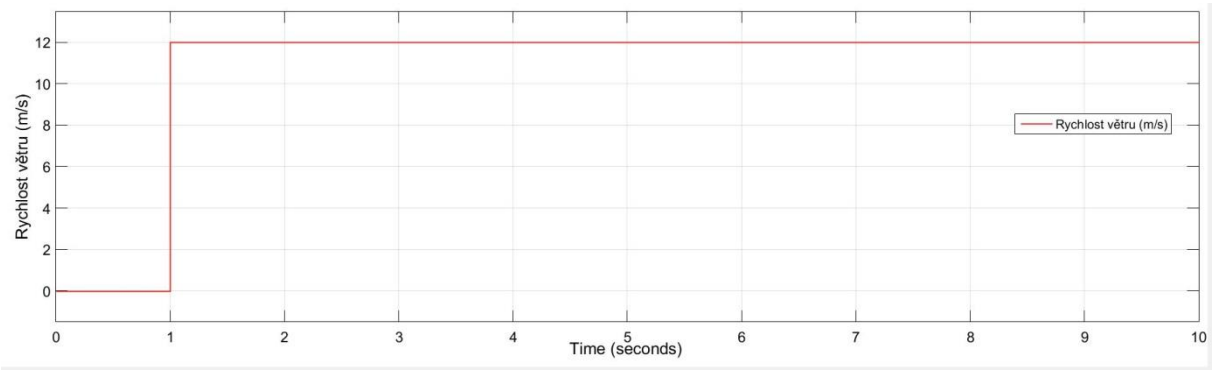
8.2 Funkční model větrné elektrárny



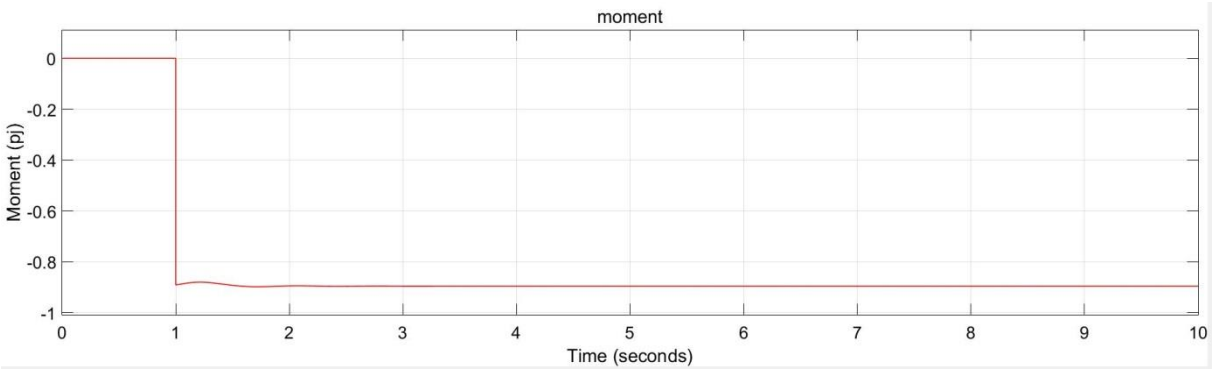
Obr. 18 Funkční model větrné elektrárny

Model byl vytvořen v prostředí Simulink a skládá z větrné turbíny, jejíž model je vytvořen z rovnic v kapitole 8.2.1. Nominální výkon turbíny je 1,5 MW, kterého dosahuje pro rychlost větru 12 $m.s^{-1}$. Vstupem do modelu turbíny je úhel natočení lopatek (ve stupních), rychlost větru a úhlová rychlost rotoru generátoru v poměrných jednotkách generátoru. Výstupem z turbíny je moment, který je přiveden na rotor generátoru. Generátorem je asynchronní stroj s kotvou na krátko a s nominálním výkonem 1,67 MW. Aby tento stroj mohl pracovat jako generátor, musí být připojen k síti (nelze jej provozovat v ostrovním režimu) a turbína jej musí roztočit do nadsynchronních otáček, což se jí podaří při rychlosti větru nad 7 m/s. Není žádoucí, aby asynchronní stroj byl připojen k síti při nižší rychlosti větru, jinak bude stroj pracovat v motorickém režimu. Z toho důvodu je mezi asynchronním strojem

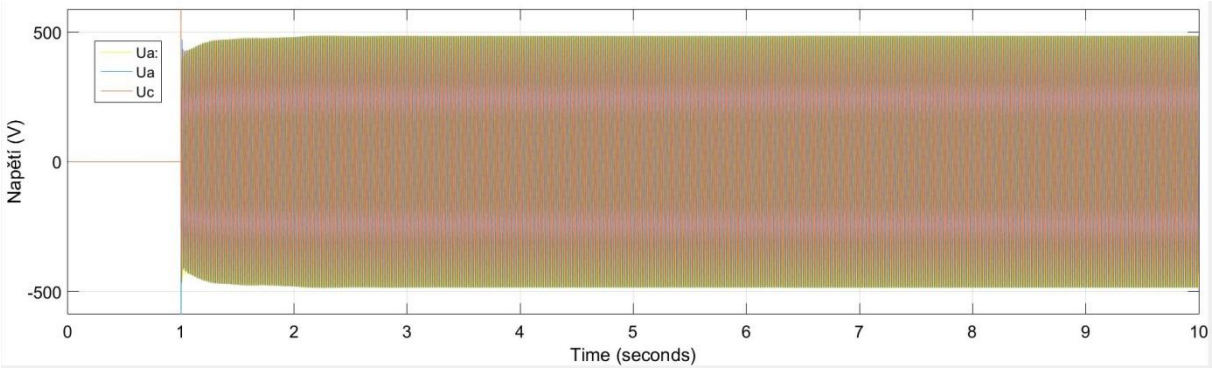
a sítí spínač, který sepne až při rychlost větru na 7,5 $m.s^{-1}$. Dále je ke generátoru připojen trojfázový kondenzátor 400 kvar, pro kompenzaci jalového výkonu. Součástí modelu je i měření fázových napětí, proudů na svorkách generátoru a také momentu vytvářeného turbínou. Průběhy těchto veličin pro průběh rychlosti větru na Obr. 19 jsou na Obr. 20, Obr. 21 a Obr. 22.



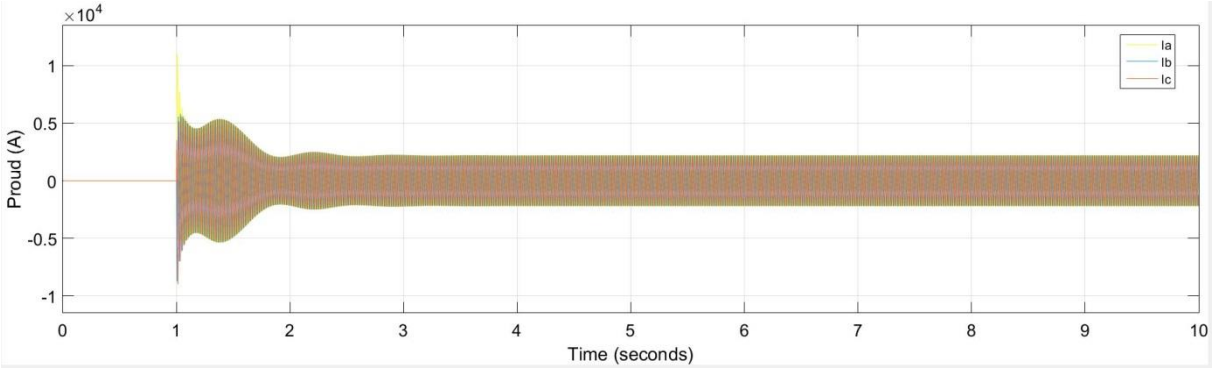
Obr. 19 Průběh rychlosti větru



Obr. 20 Průběh momentu



Obr. 21 Průběh fázových napětí na svorkách generátoru



Obr. 22 Průběh proudů na svorkách generátoru

8.2.1 Model větrné turbíny

Při konstantním zrychlení a je kinetická energie tělesa s hmotností m a rychlostí v rovna vykonané práci W při přemístění tohoto objektu silou F po dráze s.

$$E = W = F \cdot s \tag{8}$$

Podle Newtonova 2. zákona:

$$F = m \cdot a \tag{9}$$

Poté je kinetická energie rovna:

$$E = m \cdot a \cdot s \tag{10}$$

Víme že:

$$v^2 = u^2 + 2 \cdot a \cdot s \tag{11}$$

u počáteční rychlost
a konstantní zrychlení
s dráha
v rychlost na konci dráhy

Z (11) vyjádříme a, uvažujeme nulovou počáteční rychlost a dosadíme do (10). Získáme tím rovnici pro kinetickou energii tělesa.

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \tag{12}$$

Podmínkou pro platnost tohoto vztahu je konstantní hmotnost tělesa. Proto se uvažuje konstantní hustota vzduchu. Výkon, který je vítr schopen dodat je dán velikostí změny kinetické energie.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} \cdot v^2 \tag{13}$$

$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}$ je hmotnostní tok vzduchu, který je dán rovnicí:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v^3 \tag{14}$$

A plocha, skrze kterou vítr proudí.

ρ hustota vzduchu

po dosazení do (12) dostaneme

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_w{}^3 \tag{15}$$

Skutečný mechanický výkon, získaný turbínou, je dán rozdílem rychlostí větru před a za lopatkami turbíny.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_w (v_u^2 - v_d^2) \tag{16}$$

v_u rychlost větru před turbínou

v_d rychlost větru za turbínou

v_w průměr rychlostní na začátku a na konci lopatek turbíny.

$$v_w = \frac{(v_u - v_d)}{2} \tag{17}$$

po dosazení do (16) nám vyjde:

$$P_w = \frac{1}{2} \left[\rho \cdot A \cdot v_u^3 \cdot \left\{ \frac{1 - \left(\frac{v_d}{v_u} \right)^2 + \frac{v_d}{v_u} - \left(\frac{v_d}{v_u} \right)^3}{2} \right\} \right] = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_u^3 \cdot C_p \tag{18}$$

C_p koeficient výkonu (*power coefficient*)

C_p není statickou hodnotou. Její nejvyšší hodnotou je 0,593, tzv. Betzovo maximum, které udává maximální část výkonu větru, kterou dokážeme pomocí turbíny převést na mechanický výkon. C_p je závislý na dvou parametrech

$$C_p(\lambda, \theta) = C_1 (C_2 \cdot \frac{1}{\beta} - C_3 \cdot \beta \cdot \theta - C_4 \cdot \theta^x - C_5) e^{-C_6 \frac{1}{\beta}} \tag{19}$$

λ je rovna poměru $\frac{v_d}{v_u}$ nebo $\frac{\omega_t * r}{v_u}$

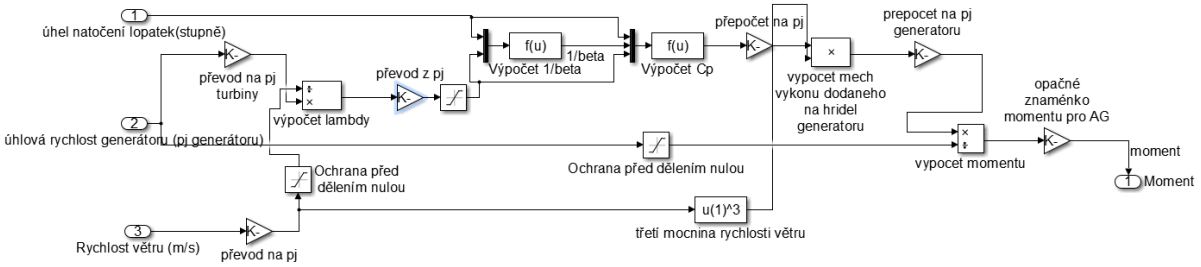
θ úhel natočení lopatek

ω_t úhlová rychlost turbíny

r poloměr turbíny (délka lopatek)

C_1 –C_6 a x jsou konstanty, které závisí na typu turbíny

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \theta} - \frac{0,035}{1 + \theta^3} \tag{20}$$



Obr. 23 Detail modelu turbíny v Simulinku

9 Požadavky a proveditelnost energetických routerů z hlediska jejich funkčního zařazení do energetického internetu

Požadavky na energetický router pro jeho funkční zapojení do energetického internetu byly stručně uvedeny v kapitole 3.1. Tyto požadavky by se daly rozdělit do tří skupin.

9.1 Požadavky na řízení toku energie sítí

Energetický router má řídit tok energie a tím vyrovnávat výrobu a spotřebu energie. Zároveň musí umožnit oboustranný tok energie sítí.

Těmto požadavkům je energetický router vyhovět jen poté, co je vybaven patřičným operačním systémem. Tyto operační systémy jsou v tuto chvíli ve vývoji, příkladem může být software vyvíjený na půdě NCSU (*North Carolina State University)* pojmenovaný DGI (D*istributed Grid Inteligence*), který by měl být společný pro všechny energetické routery v celé síti. V tuto chvíli to tedy znamená, že energetické routery schopné řídit celou síť jsou zatím neproveditelné. Ovšem právě pro vývoj těchto ovládacích softwarů se uskutečňují pilotní projekty energetického internetu/chytrých sítí, viz kapitola 7. Právě v těchto projektech jsou často použity energetické routery, které sice nedokáží řídit za pomoci dalších routerů celou síť, ovšem zvládají řídit jimi podřízenou mikrosíť.

9.2 Požadavky na komunikační rozhraní

Od energetického routeru se vyžaduje, aby byl vybaven na komunikaci v reálném čase se všemi koncovými uživateli v mikrosíti a ostatními routery, za pomoci různých komunikačních technologií

- ZigBee – bezdrátová komunikační technologie na malé vzdálenosti (do 75 m). Je určena pro komunikaci nízkovýkonových zařízení, proto je využívána hlavně v sítích PAN (*Personal Area Network*).
- Wi-Fi – bezdrátová komunikační technologie, může být použita na větší vzdálenosti než Zigbee, ovšem na rozdíl od Zigbee, které pracuje na principu M2M (*machine to machine*) je uživatel Wi-Fi sítě plně závislý na routeru.
- Ethernet – komunikační technologie využívající kabely s kroucenou dvoulinkou, optické a koaxiální kabely pro komunikaci s přenosovými rychlostmi od 1 Mbit/s po 100 Gbit/s

Za pomoci těchto komunikačních vybavení bude poté moci plnit své funkce.

9.2.1 Funkce na uživatelské úrovni

Koneční uživatelé jsou přímo spojeni s energetickým routerem a každý z těchto uživatelů musí komunikovat s energetickým routerem ohledně jakékoli energetické služby

9.2.1.1 Připojení uživatele

Pro úspěšné fungování plug and play funkce energetického internetu musí energetický router zajistit detekci nového uživatele a nastavit jeho konfiguraci pro jeho správnou funkci.

9.2.1.2 Požadavek na energetickou službu

Když správně připojený uživatel chce využít jakoukoliv energetickou službu, musí poslat zprávu s požadavkem energetickému routeru. Poté je požadavek zpracován pomocí GI (*Grid Intelligence*). Pokud je požadavek přijat, tak je nejdříve uživateli zaslána zpráva o přijetí a následně je SST nakonfigurován tak aby byla energetická služba splněna.

9.2.1.3 Aktualizace stavu

Uživatel pošle zprávu o aktualizaci stavu, kdykoli dojde ke změně. Energetický router pak na základě těchto informací může provést akci, např. ukončení služby

9.2.1.4 Ukončení služby

Když uživatel ukončuje využívání energetické služby, informuje energetický router a poté se od něj odpojí. Router následně nakonfiguruje SST tak, aby například zastavil tok výkonu.

9.2.1.5 Odpojení uživatele

Když se uživatel odpojí od sítě, musí být energetický router schopen toto odpojení zaznamenat a musí podle toho aktualizovat své rozhraní s uživateli. Tato detekce může být umožněna například periodickým sondováním uživatele a zaznamenáváním jejich reakcí. Pokud energetický router nedetekuje reakce po definovanou dobu, pak je uživatel považován za odpojeného.

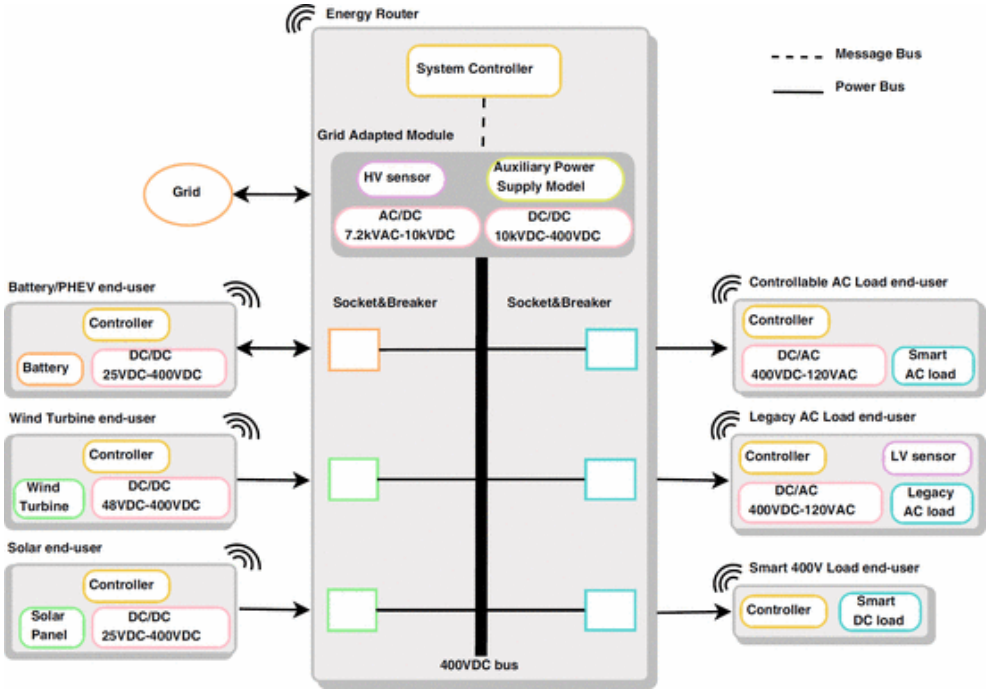
9.2.2 Funkce na síťové úrovni

Tyto funkce se liší podle charakteru mikrosítě. Dále je uvedeno pár typických příkladů:

- Během slunečného dne, kdy jsou fotovoltaické elektrárny připravené vyrábět elektrickou energii, pošlou žádost energetickému routeru. Energetický router zkontroluje lokální poptávku a stav úložišť energie. Poté povolí výrobu fotovoltaickým elektrárnám a následně nakonfiguruje SST pro požadovaný tok energie.
- Po západu slunce přestanou fotovoltaické systémy vyrábět elektrickou energii. Zároveň se zvýší poptávka. Fotovoltaický systém pošle zprávu ukončení služby a odpojí se od sítě. Energetický router poté povolí uložištím energie dodávání do sítě.
- Během noci vzroste síla větru a větrné turbíny jsou připraveny začít vyrábět elektrickou energii. Energetický router potvrdí větrným turbínám začátek výroby. Pokud výroba převýší lokální spotřebu, pak je přebytečná energie prodána skrze energetický router do sítě, aby ji mohly využít jiné mikrosítě.
- Později v noci, kdy je nižší spotřeba, začne energetický router nabíjet elektromobily a začne napájet uložiště energie.
- Během dne, kdy je cena elektřiny pro domácnosti nejlevnější, naplánuje energetický router většinu spotřeb elektrické energie. Naopak pro průmyslové uživatele je cena elektřiny ve dne vyšší a energetické routery, tak naplánují úkoly s nižší prioritou na noc.

9.3 Požadavky na silové rozhraní

Energetický router zastává funkci silového rozhraní mezi konečnými uživateli. Konečí uživatelé se však mohou lišit v nárokách na druhu vstupního napětí. V počáteční rešerši jsem uvedl, že energetický router disponuje na straně NN dvěma sběrnicemi, střídavou a stejnosměrnou, které slouží pro připojení konečných uživatelů. To ovšem není případ všech topologií energetického routeru. V některých topologiích je vynechán poslední článek SST – střídač na straně NN (Obr. 24). Energetický router pak poskytuje jako rozhraní pouze stejnosměrnou sběrnici. Na tuto sběrnici se poté připojují konečí uživatelé, či skupiny konečných uživatelů skrze měniče, které již ovšem nejsou součástí energetického routeru. Výhodou této topologie je, že pro všechny střídavé koncové uživatele v síti, není použit pouze jeden společný střídač, ovšem jejich výkon je rozdělen do několika střídačů. Jednotlivé střídače pak mohou být navrženy přesně pro potřeby k nim připojených koncových uživatelům. Nevýhodou je ovšem nutnost vést k jednotlivým měničům stejnosměrné rozvody. S těmito měniči pak energetický router může komunikovat a dokonce je i využívat jako spínače sloužící k připojení a odpojení uživatele.



Obr. 24 Topologie mikrosítě s energetickým routerem disponujícím pouze stejnosměrnou sběrnicí

10 Závěr

V první části této práce jsem vypracoval rešerši zabývající se problematikou energetického internetu, což je název pro síť umožňující oboustranný tok energie sítí, která pomocí informačních technologií balancuje výrobu a spotřebu elektrické energie, ovšem v budoucnu by energetický internet mohl zahrnovat i jiné druhy energie než jen elektrickou, např. teplo. V rešerši jsem také definoval základní pojmy týkající se této problematiky: *energetický router*, který pracuje jako rozhraní mezi konečnými uživateli a také plní funkci řídící jednotky v síti na základě pokynů ovládacího softwaru, *solid state transformer,* který je hlavní částí energetického internetu, *lokální a globální energetickou síť* a *konečného uživatele*. Zabýval jsem se v ní strukturou energetického internetu a energetického routeru a použitými technologiemi. Uvedl jsem 3 návrhy energetického routeru a na závěr rešerše jsem se věnoval shrnutí projektů chytrých sítí u nás a ve světě.

V další části jsem měl vytvořit funkční model několika konečných uživatelů energetického internetu. Prvním funkčním modelem je model fotovoltaické elektrárny, tento model má za vstup intenzitu záření a teplotu fotovoltaických článků. Výstupem z něj je pak proud a napětí. Druhým funkčním modelem je model větrné elektrárny. Ten se skládá ze dvou částí. Mnou namodelované větrné turbíny a modelu asynchronního generátoru s kotvou nakrátko, který jsem si vypůjčil z knihovny *Simscape Power Systems*. Vstupem jsou zde rychlost větru a úhel natočení lopatek turbíny. Výstupem je pak proud a napětí na svorkách generátoru.

V poslední části jsem rozvedl požadavky na energetický router, které byly naznačeny již v rešerši. Požadavky na komunikační rozhraní je energetický router schopen splnit, pokud je vybaven již známými komunikačními technologiemi. Požadavky na řízení toku energie sítí jsou splněny za použití technologie SST, ovšem má-li toto řízení sloužit k balancování výroby a spotřeby v síti, pak je zapotřebí ovládací software. Tyto ovládací softwary jsou nyní ve vývoji. Důležitý požadavek na energetický router je také, aby pracoval jako silové rozhraní mezi konečnými uživateli s různými požadavky na vstupní napětí. To je vyřešeno topologií SST, která na straně NN má stejnosměrnou sběrnici, na kterou se mohou připojit koneční uživatelé skrze různě měniče.

11 Zdroje

[1] HEYDT, Gerald a Mariesa CROW. *The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet*. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2081330.

[2] BHATTACHARYA, Subhashish a Wenye WANG. *Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic*. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2081330.

[3] WANG, Wenye a Jianhua ZHANG. *Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet*. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340.

[4] LOH, Poh Chiang a Peng WANG. *A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control*. DOI: 10.1109/TSG.2011.2116162.

[5] KANG, Chongqing a Ning ZHANG. *Generalized steady-state model for energy router with applications in power flow calculation*. DOI: 10.1109/PESGM.2016.7741416.

[6] TIAN, Qi a Li WANG. *Medium voltage solid state transformers based on 15 kV SiC MOSFET and JBS diode*. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793121.

[7] ZHOU, Youjie a Fuzhi WANG. *An overview on energy router based on various forms of energy*. DOI: 10.1109/CCDC.2016.7531478.

[8] PTÁČEK, Jiří. *Propojování energetických soustav a inteligentní energetické sítě.*

[9] ORTIZ, Gabriel, Michael LEIBL a Jonas HUBER. *Design and Experimental Testing of a Resonant DC-DC Converter for Solid-State Transformers*. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2637827.

[10] YUAN, Liqiang, Shusheng WEI a Junjie GE. *Design and implementation of AC-DC hybrid multi-port energy router for power distribution networks*. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385104.

[11] RODRÍGUEZ, Alberto, Aitor VÁZQUEZ a Diego GE. *Different Purpose Design Strategies and Techniques to Improve the Performance of a Dual Active Bridge With Phase-Shift Control*. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2309853.

[12] *https://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/vyzkum-a-vyvoj/subjekty-v-oblasti-vyzkumu-a-vyvoje/eu-verejne-zdroje-financovani/smart-grids/info-k-sr-vrchlabi.html*

[13] *http://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2016/11/Narodni-akcni-plan-pro-chytre-site.pdf*

[14] IRIE, Hiroshi. *Case study: Japan－U.S. Collaborative Smart Grid Demonstration Project in New Mexico*.

[15] WANG, Fei, Gangyao WANG a Alex HUANG. *Design and operation of A 3.6kV high performance solid state transformer based on 13kV SiC MOSFET and JBS diode*. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6954024.

[16] SANCHEZ-SQUELLA, Antonio, Romeo ORTEGA a Robert GRINO. *Dynamic Energy Router*. DOI: 10.1109/MCS.2010.938096.

[17] *https://www.freedm.ncsu.edu/projects/y8-et1-distributed-grid-intelligence-and-reliable-and-secure-communication-dgirsc/*

[18] *http://www.c40.org/profiles/2014-yokohama*

[19] MANYONGE, OCHIENG, ONYANGO a SHICHIKHA. *Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System*.

[20] ABD EL-BASIT, Wafaa, Ashraf Mosleh ABD EL–MAKSOOD a Fouad Abd El-Moniem Saad SOLIMAN. *Mathematical Model for Photovoltaic Cells*.