

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Obsah pojmu výkonová elektronika	1
1.2 Historie výkonové elektroniky	2
1.3 Základní pojmy	4
1.3.1 Takt a komutace	4
1.3.2 Klasifikace spínačů a měničů	5
1.3.3 Elektromagnetická kompatibilita	8
1.4 Způsob výkladu a jeho podpůrné prostředky	11
1.4.1 Napěťové množství	11
1.4.2 Systém poměrných jednotek „per unit“	12
2 Výkonové polovodičové součástky (VPS)	14
2.1 Diody	15
2.1.1 PIN dioda	18
2.1.2 CAL dioda	19
2.1.3 Výkonové Schottkyho diody	19
2.2 Tranzistory	21
2.2.1 Výkonové MOSFET tranzistory	21
2.2.2 SiC MOSFET tranzistory	28
2.2.3 HEMT tranzistory	29
2.2.4 IGBT tranzistory	31
2.3 Tyristory	35
2.3.1 Triodový zpětně závěrný tyristor	35
2.3.2 GTO tyristor	38
2.3.3 IGCT tyristor	40
3 Spínací obvody výkonových polovodičových součástek	42
3.1 Budící kanál tyristorů	43
3.1.1 Vypínatelné tyristory GTO a IGCT	46
3.2 Budící kanál IGBT a MOSFET	47
3.3 Další funkce driveru	48
3.3.1 Rozhraní driveru	49
3.3.2 Galvanické oddělení	50
3.3.3 Ochrana proti nadproudu a zkratu	51
3.3.4 Ochrana proti větrovému zkratu	53
3.3.5 Měření a monitoring teploty	54
3.3.6 Monitoring napájecího napětí driveru UVLO	54
3.3.7 Millerův clamp	54
3.4 Budící obvody WBG prvků	55
4 Usměrňovače s vnější komutací	57
4.1 Průběhy usměrněného napětí a proudu	57
4.1.1 Usměrňené napětí	57
4.1.2 Usměrňený proud	58

4.2	Uzlové usměrňovače při nepřerušovaném proudu	60
4.2.1	Neřízené usměrňovače	60
4.2.2	Princip fázového řízení a řídicí charakteristika	62
4.2.3	Usměrňovačový a střídačový chod	65
4.2.4	Uzlový usměrňovač s nulovou diodou	69
4.3	Můstkové usměrňovače při nepřerušovaném proudu	71
4.3.1	Můstkové spojení je sériové spojení uzlových usměrňovačů	71
4.3.2	Trojfázový plně řízený můstek	72
4.3.3	Trojfázový polořízený můstek	75
4.3.4	Jednofázový plně řízený můstek	78
4.3.5	Jednofázové polořízené můstky	80
4.4	Přerušovaný a nepřerušovaný proud p -pulsního usměrňovače	82
4.4.1	Klasická zátěž typu stejnosměrný motor nebo budicí obvod	82
4.4.2	Zátěž typu střídač	96
4.5	Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje	102
4.5.1	Průběh komutace	102
4.5.2	Zatěžovací charakteristiky	105
4.6	Měničový transformátor	114
4.6.1	Důvody použití	114
4.6.2	Proudové a napěťové poměry	115
4.6.3	Stejnoseměrná magnetizace	116
4.6.4	Typový výkon transformátoru	117
4.6.5	Hodinové číslo	118
4.7	Vzájemné porovnání základních spojení usměrňovačů	120
4.8	Sériové a paralelní kombinace usměrňovačů	120
4.8.1	Sériová spojení s omezením deformačního jalového výkonu	121
4.8.2	Sériová spojení s postupným řízením pro omezení jalového výkonu základní harmonické	126
4.8.3	Paralelní spojení	129
4.9	Regulační vlastnosti usměrňovače	135
4.9.1	Princip fázového řízení tyristorových měničů	135
4.9.2	Statické vlastnosti v oblasti nepřerušovaného proudu	136
4.9.3	Dynamické vlastnosti pro malé změny řídicího napětí	137
4.9.4	Dynamické vlastnosti pro velké změny řídicího napětí	138
4.9.5	Problém „prvního impulsu“	139
4.9.6	Proudová smyčka v oblasti nepřerušovaného proudu	140
4.9.7	Regulační vlastnosti v oblasti přerušovaného proudu	141
4.9.8	Regulátor pro oblast přerušovaného proudu PP	143
4.9.9	Rekapitulace regulačních vlastností usměrňovače	144
4.10	Simulace na počítači	144
4.11	Reverzační usměrňovačové skupiny	147
4.11.1	Střední hodnota okruhového napětí a proudu	148
4.11.2	Časový průběh okruhového proudu	149
4.11.3	Dynamický okruhový proud	150
4.11.4	Symetrické řízení	151
4.11.5	Regulační schéma s regulovaným okruhovým proudem	152
4.11.6	Regulační schéma s minimálním okruhovým proudem	152
4.11.7	Řízení bez okruhového proudu	153
4.11.8	Nevýhody okruhového proudu	154
4.11.9	Výhody okruhového proudu	154
4.11.10	Varianty silových obvodů	155

5 Stejnoseměrné spínače a pulsní měniče	158
5.1 Stejnoseměrný spínač	159
5.2 Funkce pulsních měničů	159
5.2.1 Snižování napětí	160
5.2.2 Zvyšování napětí	161
5.2.3 Snižování i zvyšování napětí	162
5.2.4 Pulsní řízení odporu	163
5.3 Řízení pulsních měničů	167
5.4 Přerušovaný a nepřerušovaný proud pulsních měničů	169
5.4.1 Analýza měniče pro snižování napětí	169
5.4.2 Analýza měniče pro zvyšování napětí	171
5.4.3 Analýza měniče pro snižování i zvyšování napětí	173
5.4.4 Analýza měničů odporu	175
5.4.5 Zatěžovací charakteristiky	176
5.5 Zvlnění proudu zátěže pulsních měničů	180
5.5.1 Poměry u měniče pro snižování nebo zvyšování napětí	181
5.5.2 Poměry u měniče pro snižování i zvyšování napětí	182
5.5.3 Poměry u měničů odporu	183
5.5.4 Poměry u měničů pro stabilizaci napětí	186
5.6 Matematické modely pulsního měniče	187
5.7 Vstupní filtr pulsního měniče	191
5.7.1 Základní vztahy pro kapacitu filtračního kondenzátoru	191
5.7.2 Analýza reálného vstupního obvodu	193
5.7.3 Syntéza vstupního filtru	198
5.8 Vícefázová spojení pulsních měničů	202
5.8.1 Vícefázová paralelní spojení	202
5.8.2 Vícefázové sériové a sérioparalelní spojení	212
5.8.3 Obraz materiálové náročnosti tlumivek a mezifázových transformátorů	217
5.9 Vícekvadrantová spojení pulsních měničů	219
5.9.1 Dvoukvadrantová spojení	219
5.9.2 Čtyřkvadrantové spojení	224
5.10 Regulační rozsah a spínací frekvence pulsních měničů	224
6 Střídače	227
6.1 Napěťové střídače	229
6.1.1 Obdélníkové řízení	234
6.1.2 Komparační ŠPM	252
6.1.3 ŠPM založená na vylučování vyšších harmonických	266
6.1.4 Vektorová ŠPM	269
6.1.4 Další způsoby řízení	281
6.1.5 Víceúrovňová spojení s upínacími diodami	288
6.1.6 Víceúrovňová spojení s plovoucími kondenzátory	296
6.1.7 Sériová spojení střídačů na vstupu, paralelní na výstupu	301
6.1.8 Paralelní spojení střídačů na vstupu, sériová na výstupu	303
6.1.9 Paralelní spojení na vstupu i výstupu	308
6.2 Proudové střídače	314
6.2.1 Vznik proudového střídače a jeho základní vlastnosti	314
6.2.2 Obdélníkové řízení	318
6.2.3 Analýza střídače s mezifázovou komutací	323
6.2.4 Lichoběžníková modulace s vypínatelnými součástkami	329
6.2.5 Důsledky využití vypínatelných součástek	332
6.2.6 Vektorová modulace	333
6.2.7 Paralelní spojení proudových střídačů	342

7 Pulsní usměrňovače	348
7.1 Napěťové pulsní usměrňovače	349
7.1.1 Jednofázové spojení	349
7.1.2 Trojfázové spojení	358
7.1.3 Ukázky oscilogramů snímaných na funkčních modelech	368
7.2 Proudové pulsní usměrňovače	370
7.2.1 Jednofázové spojení	371
7.2.2 Trojfázové spojení	385
8 Nepřímé frekvenční měniče	389
8.1 Napěťové nepřímé frekvenční měniče	389
8.1.1 Varianta bez rekuperace	390
8.1.2 Varianty umožňující rekuperaci	391
8.2 Proudové nepřímé frekvenční měniče	394
8.3 Speciální topologie nepřímých frekvenčních měničů	395
8.3.1 Víceúrovňové nepřímé frekvenční měniče	395
8.3.2 Nepřímý frekvenční měnič se středofrekvenčním transformátorem	396
8.3.3 Frekvenční měnič s kaskádně řazenými H-můstky	398
8.3.4 Modulární vícehladinový frekvenční měnič (MMC)	399
8.4 Filtry střídačů a nepřímých frekvenčních měničů	403
8.4.1 Klasifikace	403
8.4.2 Hrubý návrh vybraných druhů filtrů	404
8.5 Zvláštnosti nepřímých měničů velkých a velmi velkých výkonů	430
8.6 Vzájemné porovnání napěťových a proudových frekvenčních měničů	437
9 Měkká komutace	439
9.1 Termíny tvrdá a měkká komutace	439
9.1.1 L, C obvod – základ obvodů měkké komutace	439
9.2 Měkká komutace pulsních měničů	442
9.2.1 Měnič se spínáním ZVS	444
9.3 Měkká komutace střídačů	446
9.3.1 Klasifikace měkce komutovaných napěťových střídačů	446
9.3.2 Střídače s paralelním rezonančním meziobvodem	446
9.3.3 Střídače s kvazirezonančním meziobvodem	448
9.3.4 Střídače s pomocnými póly	452
10 Přímé frekvenční měniče	457
10.1 Přímé měniče s vnější komutací – cyklokonvertory	457
10.1.1 Použití cyklokonvertorů v praxi	458
10.1.2 Výkonové obvody	458
10.1.3 Řízení výstupního napětí cyklokonvertorů	461
10.1.4 Výstupní frekvence cyklokonvertoru	462
10.1.5 Regulace na zadaný výstupní proud cyklokonvertorů	465
10.2 Přímé maticové měniče	466
10.2.1 Základní pojmy a principy	466
10.2.2 Vybrané metody řešení ŠPM	475
10.2.3 Přímá metoda řešení skalární ŠPM	477
10.2.4 Nepřímá metoda řešení vektorové ŠPM	481
10.3 Maticové měniče nepřímé a jejich úsporná zapojení	495
10.4 Závěrem k cyklokonvertorům a maticovým měničům – včetně maticových nepřímých	498
11 Střídavé spínače a měniče napětí	499
11.1 Střídavé spínače	499
11.1.1 Jednofázový spínač	499
11.1.2 Trojfázové spínače	501

11.2	Střídavě měniče napětí	503
11.2.1	Jednofázový měnič	503
11.2.2	Trojfázový plně řízený měnič	510
11.2.3	Trojfázový polořízený měnič	517
11.2.4	Cyklicky spínaný střídavý měnič	521
12	Aplikace výkonové elektroniky	522
12.1	Dopravní technika a elektromobilita	522
12.1.1	Drážní vozidla a napájecí infrastruktura	522
12.1.2	Hybridní a elektrické autobusy	533
12.1.3	Hybridní a plně elektrická auta	536
12.1.4	Letadla a lodě	541
12.2	Energetika	544
12.2.1	Přenos a rozvod elektrické energie	544
12.2.2	Výroba elektrické energie a tepla	555
12.3	Průmysl	560
12.4	Datová centra a umělá inteligence	566
12.5	Výkonová elektronika v běžné domácnosti	566
	Seznam hlavních použitých značek a zkratk	569
	Literatura	576
	Anotace / Abstract	597

Pokud elektronický měnič přenáší větší výkonovou hladinu, než odpovídá běžným informačním nebo řídicím signálům, přísluší mu termín **výkonový elektronický měnič**. Vedle mechanických výkonových spínačů je na některých místech výhodná používání **elektronické výkonové spínače**. Oproti spínačům mechanickým jsou bezkontaktní, proto umožňují vyšší spínací frekvence a disponují delší životností.

Výkonové elektronické součástky

Nadepsané součástky jsou základním stavebním kamenem výkonových elektronických měničů a spínačů. Patří sem součástky polovodičové a již historii patří součástky iontové – výbojky. *Uvedené součástky se využívají jen ve spínacím režimu – zapnuto nebo vypnuto.*

Neřiditelné součástky – diody, neumožňují blokovat napětí v tzv. propustném směru. Při jeho velikosti cca 1 V vedou proud – chovají se jako sepnutý mechanický spínač. Při opačném směru napětí, tzv. závěrném (až jednotky kV), nevedou proud – chovají se jako vypnutý mechanický spínač. Chování diody v obvodu s rezistorem je znázorněno na obr. 1.1a.

Řiditelné součástky – tyristory, umožňují blokovat i velká napětí stejného směru jako je propustné, a to až do okamžiku přivedení proudového zapínacího impulsu přes bránu G (gate – brána), kdy nastává stav sepnutí a na součástce se objevuje propustné napětí, jen o málo větší než u diod. *Tento propustný proud je možno vypnout jen přiložením závěrného napětí na tyristor* – např. využitím záporné půlvlny napájecího zdroje (obr. 1.1b).

Vypínatelné součástky – tranzistory a vypínací tyristory, umožňují řídit okamžik zapnutí a blokovat napětí v propustném směru jako tyristory. Podstatné je, že *navíc je možné u těchto součástek vypínat propustný proud vypínacím signálem* (obr. 1.1c).

Výkonová elektronika

Nadepsaný obor se zabývá analýzou, syntézou, projektováním, konstrukcí a výrobou výkonových elektronických měničů. K uvedenému oboru též náleží fyzikální analýza, syntéza a výroba výkonových elektronických součástek (výkonových polovodičů). Nedílnou částí výkonové elektroniky je elektromagnetická kompatibilita měničů.

Obsah předložené publikace je soustředěn především na analýzu a syntézu výkonových elektronických měničů. Polovodičové součástky jsou řešeny z aplikačního hlediska. Projektováním a konstrukcí měničů se předložená kniha nezabývá. Doporučit pro ně lze