

Kapitola 1

Generování proudu plazmatem I_p na tokamaku GOLEM

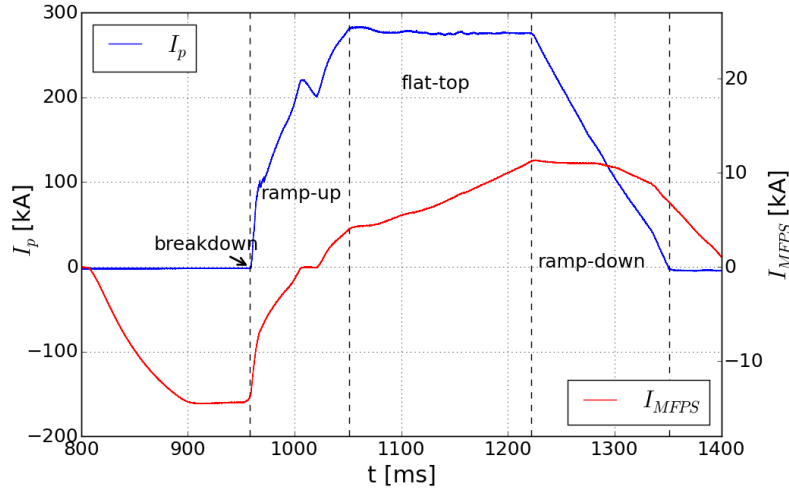
1.1 Motivace stabilizace proudu plazmatem na tokamaku GOLEM

Nedílnou součástí každého tokamaku je indukování proudu plazmatem potřebné nejen jako jeden z možných ohřevů plazmatu v podobě ohmického ohřívání, ale také jako důležitý prvek stabilizace v podobě generování poloidálního pole B_p . K takovému provozu je zapotřebí nemalé množství energie a běžné experimentální tokamaky musí být napájeny buď přímo ze sítě v podobě přívodu vysokého napětí (*Honzo, připadá mi, že si vymýšlíte, kde jste to vzal?*), nebo pomocí velkých setrvačníků DOLOŽIT.

Během experimentů na **!tokamacích!** má optimální průběh proudu plazmatem tvar tzv. **flat-topu**. To znamená, že po počátečním **!nárustu!** proudu neboli nábohové části (*ramp-up*) se následně udržuje indukovaný **!proudu!** (*to nemusí být jen indukovaný, to by bylo málo, může být i tažený, tzv 'current drive'*) v plazmatu na konstantní hodnotě až do ukončení výboje (v ideálním případě). **!Konstatní!** hodnota proudu plazmatem zajišťuje neměnné podmínky v tokamacích z hlediska stability a samotného udržení plazmatu. Lze tak předejít například různým MHD nestabilitám, nebo alespoň omezit jejich vliv na průběh výboje DOLOŽIT.

U velkých tokamaků je časový průběh proudu plazmatem nejčastěji řízen pomocí proměnlivého proudu v cívkách poloidálního pole DOLOŽIT, někdy také ve vinutí centrálního solenoidu DOLOŽIT (Vzduchové jádro místo kovového pro eliminaci neschopnosti indukování proudu v důsledku nasycení kovového jádra). Pro ukázkou takového průběhu proudu plazmatem a dosažení flat-top konfigurace využijeme naměřených dat vyobrazených na přiloženém obrázku ?? z tokamaku COMPASS dostupné z [Lubomir__Hudec].

Předdefinovaný průběh proudu tekoucí v cívkách poloidálního pole DOLOŽIT (někdy také označováno jako magnetizační pole) je označován jako I_{MFPS} (Magnetising Field Coils a jejich napájení je označováno MFPS - Magnetising Field Power Supply).



Obrázek 1.1: Ukázka dosažení flat-top průběhu na tokamaku COMPASS s předdefinovaným proudem I_{MFPS} v primárním vinutí a vzniklým indukovaným proudem plazmatem I_p jako sekundárním vinutí. Převzato z [Lubomir_Hudec]. *Komentář: TO JE SUPR, že jste tohle našli. TOHLE JE HROZNĚ pro vás zajímavé. Oni si před výbojem pošlou dopředu záporný proud a zvýší si tam manipulační prostor. To byste měl určitě zkusit!*

Z přiloženého obrázku ?? můžeme vidět, že napájecí proud I_{MFPS} jde zpočátku do záporných hodnot. To je z důvodu maximálního rozsahu proudu potřebné pro zajištění dostatečné změny potřebné pro generování indukovaného proudu v plazmatu na **!dostatečně!** dlouho (*Jejda, sám to tu píšete, proč jste to nezkoušel na tG?*). Po dosažení hodnoty proudu přibližně -150kA se přibližně 50ms počká a následně dojde k prudkému **!nárustu!** proudu v primárním vinutí (*Tady píšete v primárním vinutí .. to přece nejsou cívky poloidálního pole*). Tento bod výboje je označován jako **breakdown**. Do tohoto bodu zůstává proud plazmatem I_p na nulové hodnotě, protože se jedná pouze o **!přípavnou!** fázi před samotným výbojem.

Od doby breakdownu do přibližně 1000ms dochází k **!nárustu!** proudu na I_{MFPS} a také k nárustu proudu plazmatem I_p . Zde je další význačný bod výboje, protože proud na I_{MFPS} se blíží k nulové hodnotě a bude zde docházet k přepolování. Lze se povšimnout, že proud na I_{MFPS} je chvíli na nulové hodnotě. Proud plazmatem I_p se pohybuje přibližně okolo 200kA. Nulový proud na I_{MFPS} je z důvodu krátké latence tyristorového měniče, který zajistí pokračování napájení s původní polaritou (tj. částice plazmatu nebudou v důsledku přepolování urychlovány opačným směrem což by mělo za následek selhání výboje). Poté opět dochází k nárustu proudu na I_{MFPS} přibližně do doby 1050ms, kde je další význačný bod. Během této doby dochází opět k nárustu proudu plazmatem přibližně na hodnotu okolo 290kA. Fázi od doby breakdownu do přibližně 1050ms je označena jako **ramp-up**.

Po dosažení hodnoty ramp-up dochází k dalšímu nárustu proudu na I_{MFPS} , ale změna proudu je řádově nižší a navíc má lineární charakter přibližně do doby okolo 1220ms, kdy dosáhneme maximálního proudu na I_{MFPS} okolo 120kA. V tomto časovém okně se již proud plazmatem I_p nezvyšuje a je udržován na své přechodné hodnotě okolo 290kA. Zde dochází k již zmiňovanému průběhu výboje známé jako **flat-top**.

Po dosažení maximální hodnoty proudu v poloidálních cívkách (*primárních? Zkondenzovat!*) není magnetizační vinutí schopné dodat plazmatu dostatečný magnetický tok, který je dán změnou proudu v tomto vinutí. Dochází ke ztrátě stability proudu plazmatem a k poklesu proudu v poloidálních cívkách a výboj je postupně ukončen. Tuto fázi výboje označujeme jako **ramp-down**.

V případě tokamaku COMPASS se jedná o napájení pomocí **!setvačnicků!**. Potřebný proud v **!poloidáních!** cívkách zajišťuje komplikovaný řídicí obvod, který se skládá ze sestavy tyristorů a odporů, které dokáží tvarovat průběh proudu ze **!setravačnickového!** zdroje.

V případě tokamaku **GOLEM** je způsob napájení zcela odlišný. Jak už víme, tak hlavní misí tokamaku GOLEM je převážně vzdělávání studentů v oblasti termojaderné fúze a fyziky tokamaků. Aby byl tokamak GOLEM maximálně přístupný studentům, tak bylo zapotřebí snížit (*to asi není tak nějak důvod*) jeho provoz na minimum. Proto byl volen v minulosti způsob napájení pomocí silné transformátorové/**kondenzátorové** baterie viz obrázek ??, která byla schopna dodat dostatečné množství energie ke klíčovým komponentům. Mezi tyto klíčové komponenty řadíme jednak napájení toroidálních cívek potřebných pro magnetickou stabilizaci (*blbě*) a jednak pro napájení primárního vinutí potřebného pro indukování proudu plazmatem prostřednictvím transformátorovým jádrem (*Zde jazyková neobratnost*).



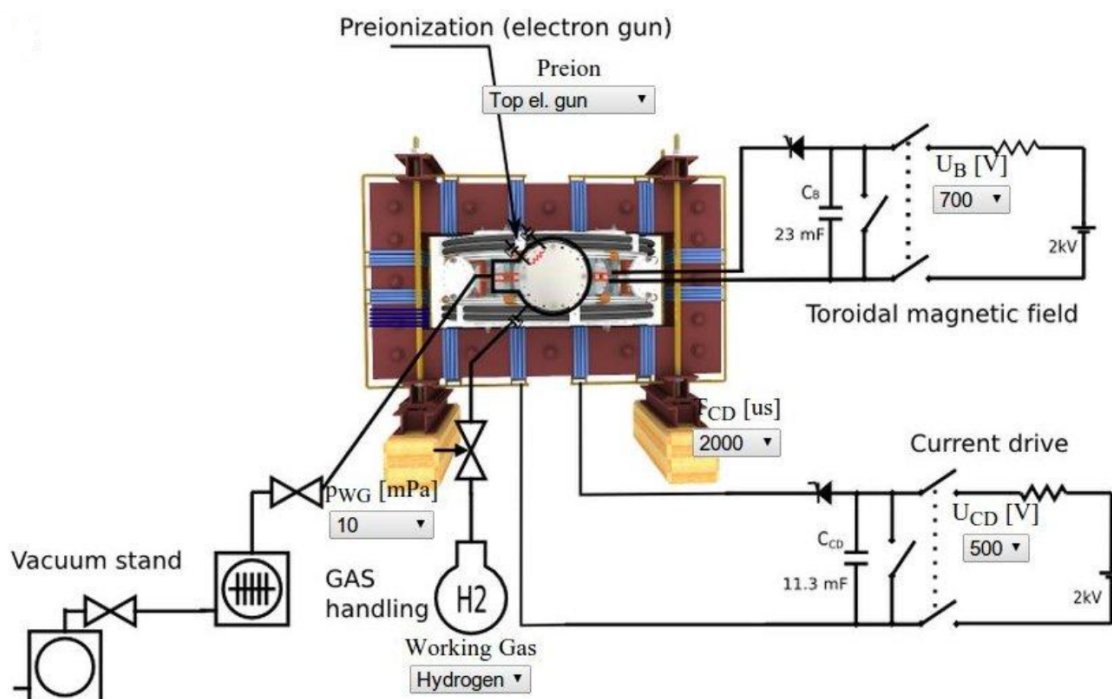
Obrázek 1.2: Ukázka/**Foto** transformátorové baterie tokamaku GOLEM. Převzato z [kondenzator_prozatimni].

~~Mezi zásadní výhody provozu tokamaku pomocí transformátorové baterie je dosažení velkých energií bez nutnosti přídavného vedení vysokého napětí ze sítě s čímž se váží jistá povolení, která by mohla omezit provoz tokamaku, ale také hlavně levný a poměrně spolehlivý provoz.~~

Nevýhodou kondenzátorů obecně je jejich nekontrolované vybití, které má zásadní vliv na průběh výboje tokamaku. Křivka vybíjení kondenzátorové baterie je pevně dána parametry RLC obvodu. Mezi tyto zásadní parametry jak je již patrné z názvu

bezprostředně patří odpor R , indukčnost L a kapacita C .

V případě tokamaku GOLEM je obvod primárního vinutí (Current drive) viz **+obrázek+ ??** velmi podobný idealizovanému RLC obvodu viz obrázek ?? (*proč referovat v jedné větě 2x ?*). Do jisté míry budeme schopni napájecí obvod primárního vinutí tokamaku Golem tímto idealizovaným RLC obvodem aproximovat. Napájecí obvod primárního vinutí se skládá z primárních cívek, kondenzátorové baterie, která je spouštěna tyristorem a obvodu pro samotné napájení společně se zkratovacím obvodem. Jediné co zde chybí, ale bude nutné započítat je nějaký celkový odpor napájecího obvodu (*Dyť to tam je!*), který bude třeba zjistit. (*Ale mám pocit, že si to pletete, potřebujeme zjistit odpor vybíjecí části obvodu*)

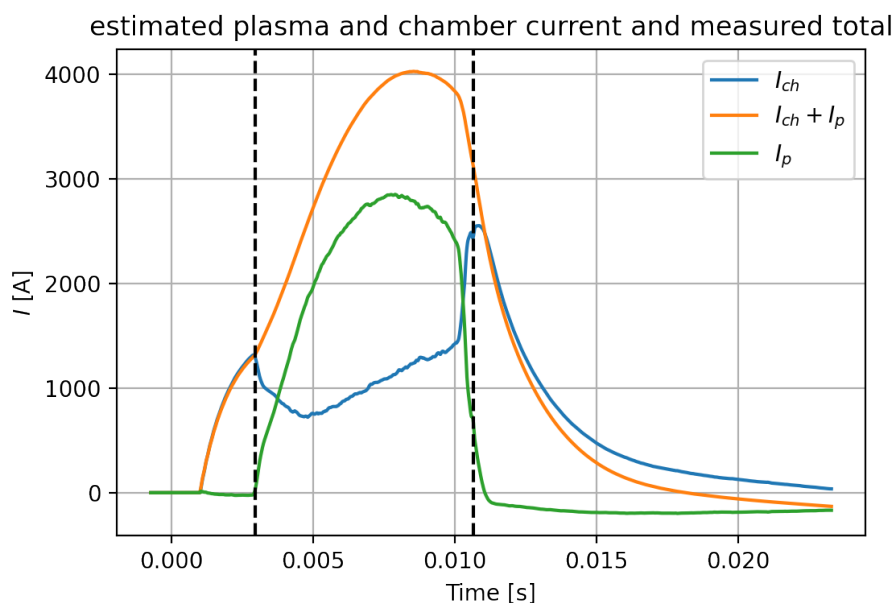


Obrázek 1.3: !Digitální! (*Co myslíte tím 'Digitální'*) prostředí Control room tokamaku GOLEM. Převzato a upraveno z [Golem_control_room].

Pro ukázkou aktuálního průběhu proudu I_p plazmatem na tokamaku Golem využijeme výboje číslo 42034 dostupného z [vyboj_42437]. Naměřené hodnoty jednotlivých veličin jsou znázorněny na následujícím **!obázku!** ??.

Ze vzorové ukázky na obrázku ?? lze vidět, že proud I_p má přibližně sinusový charakter, resp. má tvar první jeho půlvy. Tento specifický průběh je dán vybíjením kondenzátoru do primárního vinutí a následným naindukováním proudu v plazmatu. Čeho si lze také povšimnout, že **část** část magnetického indukčního toku generovaného primárním vinutím tokamaku se spotřebuje na indukování proudu komorou I_{ch} .

Abychom dosáhli na tokamaku GOLEM podobného průběhu jako například na již zmiňovaném tokamaku COMPASS, tak je zapotřebí současný indukovaný proud plazmatem I_p vyrovnat na nějaký časový okamžik na konstantní hodnotu tedy dosáhnout **flat-top** konfigurace proudu plazmatem I_p jako jsme již viděli na obrázku ??.



Obrázek 1.4: Ukázka naměřeného proudu protékajícího komorou I_{ch} a proudu plazmatem I_p v závislosti na čase na tokamaku GOLEM z výboje číslo 42437. Převzato a upraveno z [vyboj_42437].

1.2 Stabilizace proudu plazmatem na tokamaku GOLEM pomocí proudových zesilovačů

Jako nadějný způsob řešení se ukazuje řešení pomocí implementace přídavného obvodu obsahující druhé nezávislé primární vinutí na transformátorové jádro GOLEMA, které by současný vývoj proudu plazmatem byl schopen vyrovnat na požadované hodnoty. U **!moderním!** experimentálních tokamaků se takového řešení využívá v podobě vyhlazovacích obvodů pro tvarování **+proudu, ne?+** plazmatu (**Zde jazyková neobratnost**) **+jak jsme si popsali u tokamaku COMPASS, ne?+**. Podobného principu bychom chtěli využít na vyhlazení průběhu proudu plazmatem I_p . Tento obvod by byl napájen **proudovým zesilovačem**, který je schopen zesílit jakýkoli předem definovaný signál **+,+** což patří mezi jeho výrazné výhody. Pro předdefinování průběhu bychom využili **!frekvenčního!** generátoru zapojeného přímo do zesilovače, kterému lze naprogramovat předem definovanou wave-formu (**MUSÍTE nakreslit nějaké základní schéma, když to tu popisujete. Slova moc nestačí. Plus musíte něco říct o té wave-formě (možná byste to slovo mohl použít už u toho příkladu s COMPASSem)**). Zesilovač tento signál pouze mnohonásobně zesílí a pošle do přídavného vinutí na transformátorovém jádře. Další výhodou je možnost zapojit více takových zesilovačů seriově nebo paralelně (závisí zda-li chceme maximalizovat proud nebo napětí) a tak docílit potřebného výkonu. Ukázka zesilovače KEPCO je na obrázku ?? (**Možná by nebylo špatné uvést jeho klíčové parametry z dokumentace, neboť je to klíčový prvek**).

Důležité je zmínit, že se jedná pouze o hypotetický způsob řešení a nikoli o prokázaný koncept (**jak to tedy mají na tom COMPASSu? Čím se to liší?**). Proto je nutné před samotnou implementací tohoto způsobu řešení na tokamak GOLEM nejdříve doká-

zat pravdivost a hlavně funkčnost tohoto řešení jiným **++** než přímým implementováním na samotný tokamak, protože se jedná o poměrně finančně nákladný projekt. Toto ověření proběhne pomocí konstrukce na tzv. **Table-top experimentu**, který by danou situaci měl do jisté míry simulovat ve zmenšené laboratorní verzi s využitím dostupných laboratorních zařízení a jednoho testovacího proudového zesilovače. Dané měření bude třeba podložit příslušným idealizovaným numerickým řešením rovnic **+asi čárka, ne?+** popisující daný elektrický systém a dojde k porovnání těchto dat. To je z důvodu **++** abychom dokázali předpovídat chování v systému v **!závislosti!** na změně parametrů v obvodu, nebo poslané wave-formy do zesilovače.

Pokud bude tento způsob řešení úspěšně prohlášen za funkční v table-top verzi, tak poté proběhnou potřebné výpočty pro zakoupení příslušných technologií a proběhne implementace na samotný tokamak GOLEM. ~~V opačném případě, pokud se prokáže neúspěch této metody stabilizace, tak bude potřeba hledat možné konstrukční nebo fyzikální chyby a přemýšlet o jejich eliminaci, nebo bude potřeba přijít s jiným možným řešením této problematiky.~~



Obrázek 1.5: Ukázka proudového zesilovače KEPCO konfigurace 20V/20A. Tento zesilovač společně s dalšími mezi sebou propojenými slouží pro **magnetickou** stabilizaci **+polohy plazmatu+** na tokamaku GOLEM.