

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NAPÁJECÍ SOUSTAVA S PULSNÍM GENERÁTOREM PRO TOKAMAK
COMPASS D

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

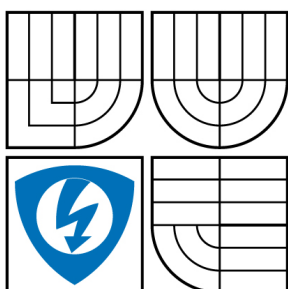
Bc. MAREK ANTL

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NAPÁJECÍ SOUSTAVA S PULSNÍM GENERÁTOREM PRO TOKAMAK COMPASS D

TOKAMAK COMPASS D POWER SUPPLY SYSTEM WITH FLYWHEEL PULSE GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

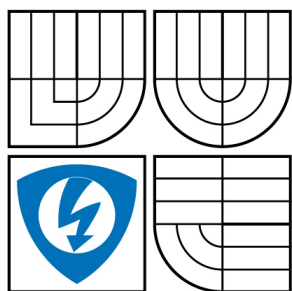
Bc. MAREK ANTL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektroenergetika

Student: Antl Marek Bc.

ID: 47558

Ročník: 2

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Napájecí soustava s pulsním generátorem pro tokamak COMPASS D

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis technologického vybavení pro napájení tokamaku COMPASS D a elektrické sítě s pulsními generátory
2. Stanovení parametrů napájecí soustavy tokamaku
3. Návrh napájecí sítě a dimenzování jednotlivých prvků
4. Ověření parametrů napájecí soustavy po realizaci

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 28.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Marek Antl
Bytem: Lutín 288, 78349, Lutín
Narozen/a (datum a místo): 28.5.1983, Prostějov

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Napájecí soustava s pulsním generátorem pro tokamak
COMPASS D

Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě - počet exemplářů 1
- elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracování díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

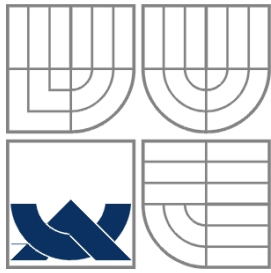
Bibliografická citace práce:

ANTL, M. Napájecí soustava s pulsními generátory pro tokamak COMPASS D. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2008, 80 stran.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

Napájecí soustava s pulsními generátory pro tokamak COMPASS D

Bc. Marek ANTL

vedoucí: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Tokamak COMPASS D power supply system with flywheel pulse generator

by

Bc. Marek ANTL

Supervisor: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Jeden z možných způsobů, jak zajistit do dalších let nezbytnou elektrickou energii je pomocí termojaderné syntézy. Zařízení, které se zabývá touto problematikou se nazývá stellarátor nebo tokamak. V této mé práci uvádím princip činnosti tokamaku a jeho postupný vývoj s náhledem na budoucnost. Přesněji se zabývám konkrétním tokamakem, který byl převezen z Culhamu do Prahy a jeho zdrojem napájení, který musel být nově navržen. Jedná se o tokamak COMPASS D. Zaměření mé práce spočívá v části napájení cívek tokamaku a energetické prvky v jeho napájecí cestě. Jedná se však jen o zkušební zařízení, které má ještě dlouhou cestu před sebou ke zdárnému konci, kterým je dodávání elektrické energie ve větší míře než je energie spotřebovaná. V současné době jde pouze o zkušební zařízení, na kterém se provádějí testy a různé zkoušky. Výsledky těchto zkoušek budou použity pro další bádání a povedou k lepším výsledkům tohoto i jiných zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA: Tokamak; COMPASS D; Ústav fyziky plazmatu akademie věd České Republiky; Pulsní generátor; Termojaderná syntéza; Energie budoucnosti

ABSTRACT

One of the possible ways, how to ensure the necessary electric energy to the future is by the thermonuclear synthesis. Systems that deal with this problem are called stellarator or tokamak. In my work I describe the working principle of the tokamak and its possible future evolution. More precisely I deal with particular tokamak that was brought from Culham to the Prague and its power supply, which became a problem. It is tokamak model COMPASS D. My work consists in power supplying of tokamak coils and power elements in its supply way. However it is just a test gear, which has a long way to the successful end, which is power supplying instead of power burning. It is just a test gear on which are various tests and analyses carried out nowadays. Results of these tests will be used for another research and to improve the results of this or other facilities.

KEY WORDS: Tokamak; COMPASS D; Institute of plasma physics of the Academy of Science, Czech Republic; Pulse generator; Thermonuclear synthesis; Energy Futures

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	15
1 ÚVOD.....	16
2 CÍLE PRÁCE	21
3 POPIS TECHNOLOGICKÉHO VYBAVENÍ PRO NAPÁJENÍ TOKAMAKU COMPASS D A ELEKTRICKÉ SÍTĚ S PULZNÍMI GENERÁTORY.....	22
3.1 BLOK TOKAMAKU COMPASS D.....	22
3.1.1 HISTORIE.....	22
3.1.2 POPIS FUNKCE A SYSTÉM CÍVEK TOKAMAKU	24
3.1.2.1 magnetizační vinutí (OH / MFPS)	24
3.1.2.2 rovnovážné vinutí (zdroj EFPS)	25
3.1.2.3 tvarovací vinutí (zdroj SFPS)	25
3.1.2.4 rychlé zpětnovazební vinutí (zdroj FFPS)	25
3.1.3 ENERGETICKÁ BILANCE TOKAMAKU	25
3.2 BLOK NAPÁJENÍ TOKAMAKU COMPASS D	27
3.2.1 ROZVADĚČE SÍTĚ	27
3.2.2 TRANSFORMÁTORY.....	27
3.2.3 STEJNOSMĚRNÉ MĚNIČE	28
3.2.3.1 Toroidální vinutí Obr. 3-6.....	29
3.2.3.2 Poloidální vinutí Obr. 3-7	29
3.2.4 AKUMULACE ENERGIE (GENERÁTORY + SETRVAČNÍKY) OBR. 3-14	35
3.3 BLOK SYSTÉMU ŘÍZENÍ OBR. 3-15.....	36
3.3.1 MODULY ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU.....	37
3.3.2 PROVOZ SUBSYSTÉMŮ	37
3.3.3 NASTAVENÍ ALGORITMŮ A UKLÁDÁNÍ NASTAVENÍ	38
3.3.4 MONITOROVÁNÍ PROVOZU.....	38
4 STANOVENÍ PARAMETRŮ NAPÁJECÍ SOUSTAVY TOKAMAKU	40
4.1 PARAMETRY CÍVEK TOKAMAKU	40
4.1.1 PARAMETRY CÍVEK TOROIDNÍHO VINUTÍ. PŘÍKLAD TVARU PRŮBĚHU PROUDU BĚHEM VÝBOJE	40
4.1.2 PARAMETRY CÍVEK POLOIDÁLNÍCH VINUTÍ. PŘÍKLAD TVARU PRŮBĚHU PROUDU BĚHEM VÝBOJE	40
4.2 TRANSFORMÁTORY.....	41
4.2.1 SPOLEČNÉ POZNÁMKY KE KONSTRUKCI TRANSFORMÁTORŮ V SÍTI 6KV/85HZ.....	41
4.2.2 POŽADAVKY PRO JEDNOTLIVÉ TRANSFORMÁTORY:.....	42
4.3 SPECIFIKACE MĚNIČŮ.....	44
4.3.1 MĚNIČ PRO TOROIDÁLNÍ VINUTÍ.....	45
4.3.2 MĚNIČ PRO VINUTÍ EFPS: (ROVNOVÁŽNÉ VINUTÍ).....	45
4.3.3 MĚNIČ PRO VINUTÍ SFPS: (TVAROVACÍ VINUTÍ)	45
4.3.4 MĚNIČ PRO VINUTÍ OH / MFPS: (MAGNETIZAČNÍ VINUTÍ).....	46
4.4 AKUMULAČNÍ ZDROJ ENERGIE TAB. 4-1.....	47
5 NÁVRH NAPÁJECÍ SÍTĚ A DIMENZOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ	49

5.1 ROZDĚLENÍ NAPÁJECÍ SÍTĚ DO JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ PODLE NAPÁJENÝCH CÍVEK V TOKAMAKU	49
5.1.1 BLOK NAPÁJENÍ SOUSTAV TOROIDÁLNÍHO VINUTÍ TOKAMAKU COMPASS D (TF) <i>OBR. 5-1 A OBR 5-2</i>	50
5.1.2 BLOK NAPÁJENÍ POLOIDÁLNÍHO VINUTÍ EFPS A SFPS TOKAMAKU COMPASS D <i>OBR. 5-3</i>	53
5.1.3 BLOK NAPÁJENÍ POLOIDÁLNÍHO VINUTÍ MFPS/OH TOKAMAKU COMPASS D <i>OBR. 5-4</i>	55
5.2 SPECIFIKACE POUŽITÝCH PRVKŮ	56
5.2.1 TRANSFORMÁTORY.....	56
5.2.2 PROPOJOVACÍ KABELY.....	58
5.2.2.1 <i>Dimenzování kabelů:</i>	58
5.2.2.2 <i>1x6-AYKCY 3x240/35 Obr. 5-5</i>	65
5.2.2.3 <i>1-CYKY 3x150 Obr. 5-6</i>	66
5.2.2.4 <i>NYO 4x185 Obr. 5-7</i>	67
5.2.3 MĚNIČE	68
5.2.4 OCHRANY	68
5.2.5 GENERÁTORY.....	69
5.2.5.1 <i>Popis akumulčního zdroje a konstrukce generátorů</i>	69
5.2.5.2 <i>Technická specifikace generátoru (85Hz)</i>	73
5.2.5.3 <i>Technická specifikace generátoru (65Hz)</i>	74
6 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ NAPÁJECÍ SOUSTAVY PO REALIZACI	75
6.1 PŘEJÍMKA VE VÝROBNÍM ZÁVODĚ	75
6.1.1 ZAŘÍZENÍ ELEKTRO	75
6.1.2 ŘÍDÍCÍ SYSTÉM.....	75
6.2 NAPĚŤOVÁ ZKOUŠKA PROTI ZEMI	76
6.3 ZKOUŠKY KABELŮ 6kV	76
6.4 MĚŘENÍ VELIKOSTI ODPORU ZEMNÍ SOUSTAVY	76
6.5 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU ZAŘÍZENÍ TOKAMAKU.	76
6.6 SEKUNDÁRNÍ ZKOUŠKY OCHRAN 6kV	76
6.7 ZKOUŠKA FUNKČNOSTI ŘÍZENÍ USMĚRŇOVAČŮ SNÍŽENÍM NAPĚTÍM	77
6.8 ROZTOČENÍ GENERÁTORU PŘI PROVOZU S POMOCNÝM BUZENÍM, PAK S BUZENÍM VLASTNÍM.	77
6.9 ZKOUŠKA TOKAMAKU BEZ PLAZMY	77
6.10 ZKOUŠKA TOKAMAKU S PLAZMOU	78
7 ZÁVĚR	79
POUŽITÁ LITERATURA	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 schéma tokamaku [4].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1-2 Ohřev a tvarování plazmatu: vlevo jsou vidět dva význačné směry v komoře tokamaku: toroidální a poloidální a vpravo jsou vyobrazeny tři metody vnějšího ohřevu plazmatu v tokamaku: základní ohmický a dodatečný s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem, respektive s vstřikem svazku vysokoenergetických neutrálních atomů [4]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1-3 Srovnání velikostí současných tokamaků s geometrií plazmatu podobných ITERu [7].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1-4 schéma termojaderné elektrárny [4]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-1 náčrt tokamaku COMPASS D [7]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-2 pohled na tokamak shora obr vlevo a z boku v 1. patře obr. Vpravo [7].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-3 pohled pod tokamak v přízemí [7]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-4 anuloid [5]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-5 blokové schéma napájení cívek Tokamaku přes generátor, rozvaděč, transformátor a měnič</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-6 obvod toroidálního vinutí [8]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-7 poloidální vinutí [8].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-8 obvody poloidálních vinutí [8]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-9 Zjednodušený obvod poloidálních polí [8].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-10 Idealizované průběhy proudů [8]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-11 Reálné průběhy poloidálních proudů, výboj #22053 [8]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3-12 Reálné průběhy napětí na závit a proudu plazmatu, výboj #22053 [8]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-13 Schéma obvodu OH start [8].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-14 blokové znázornění akumulace energie – přes motor napájený generátor se setrvačником do napájecího systému cívek</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-15 přehledové schéma řídicího systému. Červená čára vyznačuje tu část systému, která je předmětem výběrového řízení [8]</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-1 proudy TF a plazmatu [8]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-2 zátěž generátoru pro $TF = 1.2 T$ [8]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-3 proud a napětí TF pro $TF = 2.1 T$ [8].....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-4 zátěž generátoru 1 - $TF = 2.1 T$ [8]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-5 proudy PF pro plný výkon [8]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-6 zátěž generátoru 2 - PF pro plný výkon [8]</i>	<i>48</i>

<i>Obr. 5-1 a Obr. 5-2 napájení cívek toroidálního vnutí (TF) Počátek je v rozvaděči.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5-3 schematické zapojení pro napájení cívek EFPS a SFPS poloidálního vnutí.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5-4 napájení cívky MFPS/OH.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 5-5 Ukázka kabelu 1x6-AYKCY 3x240/35 [3]</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 5-6 kabel 1-CYKY 4x150+70 bez PEN vodiče je to vodič 3x150 [3]</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 5-7 kabel NYY O 4x185 [3].....</i>	<i>67</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1-1 Přehled největších světových a evropských tokamaků [4].....</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 3-1 toroidální pole 1,2 T / délka výboje cca 1 sec [8]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3-2 toroidální pole 2,1 T / délka výboje cca 0.5 sec [8]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 4-1 synchronní generátor se setrvačником (jeden kus) [8]:</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-1 parametry použitých transformátorů:.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 5-2 výňatek z tabulky pro složení jádra kabelu 1x6-AYKCY 3x240 [3].....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 5-3 výběr parametrů kabelu pro stínění 25 pro uložení ve vzduchu [3].....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 5-4 výňatek z tabulky pro složení jádra kabelu 1-CYKY 3x150 [3].....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 5-5 výběr parametrů kabelu 1-CYKY 3x150 pro uložení ve vzduchu [3]</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 5-6 výběr parametrů kabelu 1-CYKY 3x150 pro uložení ve vzduchu [3]</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 5-7 Technická specifikace generátoru (85Hz) [8]</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 5-8 Technická specifikace generátoru (65Hz) [8]</i>	<i>74</i>

1 ÚVOD

Z bádání na celém světě je pravděpodobné, že za určitý čas, který je v každých zemích rozdílný a předvídatelný různě, dojdou neobnovitelné zdroje energie, které potřebujeme v našem případě na výrobu elektrické energie. Tedy by došlo k jejímu nedostatku, což by zapříčinilo globální kolaps:

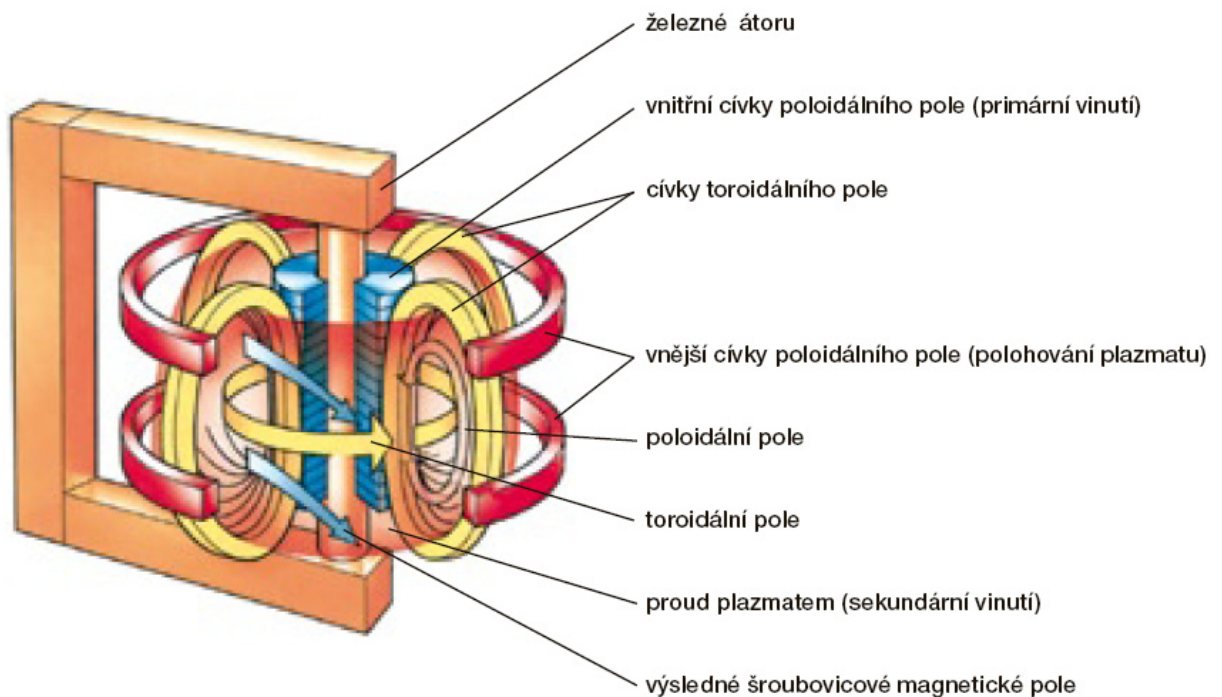
- a) vyčerpáním dosavadních zdrojů,
- b) nárůstem poptávky,
- c) zhoršením životního prostředí,
- d) všemi předchozími událostmi současně.

Termojaderná fúze, je považovaná jako východisko k zajištění energie do dalších let. Soustrojí, zabývající se touto fúzí je Tokamak. Může nahradit elektrárny založené nejen na štěpení jader - jaderné elektrárny i elektrárny založené na spotřebovávání neobnovitelných zdrojů naší planety.

Tokamak (zkratka ruských slov: TOroidalnaja KAmera i MAgnitnyje Katuški – toroidální komora a magnetické cívky) je jedním z nejslibnějších typů zařízení pro uskutečnění řízené termojaderné fúze, v budoucnu i stavby fúzní elektrárny. Jeho koncepce se zrodila v letech 1950–2 v bývalém Sovětském svazu díky týmu slavného ruského fyzika Andreje Sacharova. Tokamak si můžeme představit jako dutou prstencovou komoru (nafouknutou automobilovou pneumatiku) naplněnou horkým vodíkovým plynem, která je obklopena magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem.

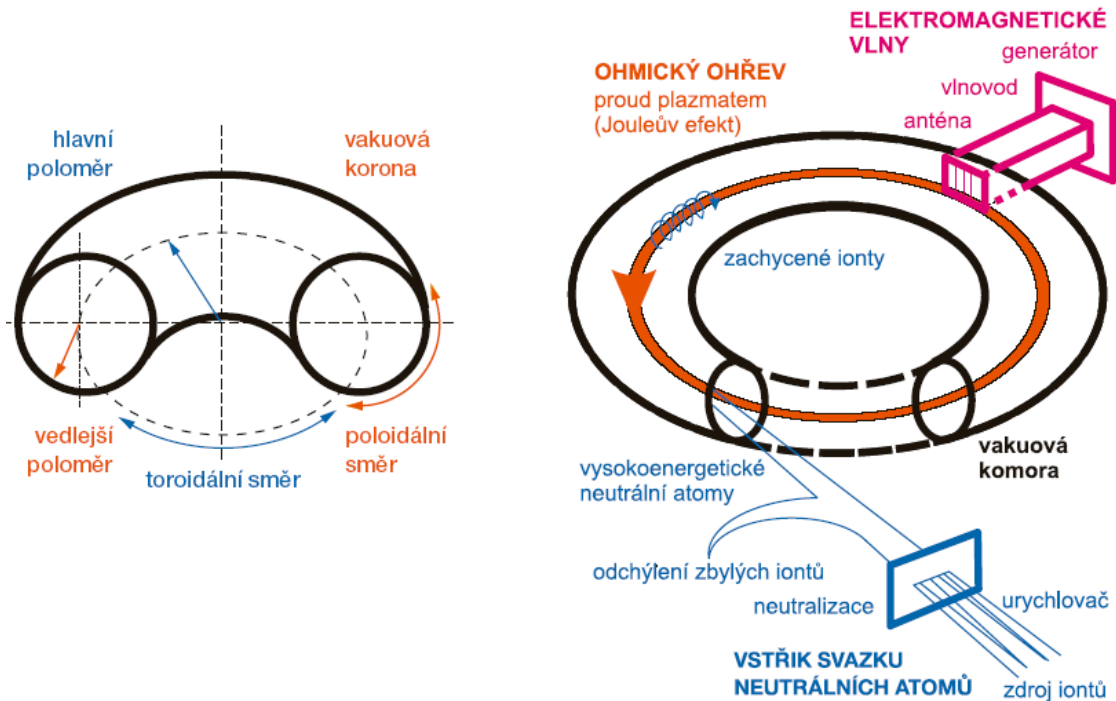
V tokamaku rozlišujeme dva význačné směry – toroidální a poloidální, a dva význačné poloměry – hlavní a vedlejší. Toroidální směr můžeme sledovat, vydáme-li se podél prstence, zatímco v poloidálním směru bychom kroužili kolem komory v rovině kolmé na toroidální směr. Hlavní poloměr R je poloměrem prstence, tj. vzdálenost rotační osy celého prstence od osy komory. Vedlejší poloměr a je poloměr samotné komory.

Tokamak patří mezi koncepce termojaderných zařízení s magnetickým udržením částic (paliva). Toroidální složka magnetického pole (o síle 1–10 Tesla) je vytvářena magnetickými cívkami, poloidální složka je přibližně 100× menší a je indukována elektrickým proudem procházejícím vodíkovým plazmatem uvnitř komory. Obě složky dohromady tak vytvářejí sřížné pole *Obr. 1-1*.



Obr. 1-1 schéma tokamaku [4]

Termojaderných teplot řádu stovek milionů stupňů, potřebných k tomu, aby se jádra vodíku začala slučovat na helium za uvolnění velkého množství energie, se musí dosáhnout bezkontaktním ohřevem. Veškeré látky jsou totiž již při teplotách okolo deseti tisíc stupňů plynné. Tokamaky využívají princip transformátoru, kde komora s plynem tvoří jediný závit jeho sekundárního vinutí. Vybitím kondenzátorové baterie (jen u malých přístrojů, velké používají setrvačnik nebo přímo rozvodnou síť) do primárního vinutí se elektromagnetickou indukcí vybudí proud v sekundárním vinutí, kterým je plyn uvnitř prstencové komory. Díky značnému elektrickému odporu je vodíkový plyn rychle ohříván Jouleovým teplem ($P = R \times I^2$, kde P je uvolňovaný výkon, R je elektrický odpor plazmatického provazce a I je protékající proud). Během jediné milisekundy se dosáhne teploty milionů stupňů a zprvu jen slabě ionizovaný vodíkový plyn se změní v plně ionizované plazma tvořené směsí elektronů a atomových jader. Jak se vzrůstající teplotou klesá elektrický odpor plazmatu, začíná být induktivní ohřev neúčinný. Nastupují další metody ohřevu. Hojně využívané jsou metody založené na absorpci elektromagnetického vlnění v ohřívaném médiu, jejichž obdoba se uplatňuje i v domácnostech v mikrovlnných troubách. Naprosto odlišným přístupem je vstřik malého množství neutrálních atomů vodíku s energií rovnou až stonásobku teploty plazmatu, které svoji energii předají srážkami okolnímu plazmatu. Jakmile se podaří dosáhnout termojaderných teplot, začnou se vodíková jádra slučovat a část energie uvolňované fúzními reakcemi plazma ohřívá (samoohřev), podobně jako plazma ohřívaly vstřikované částice v předchozím případě. A právě ve fúzních elektrárnách se vyjma krátkého okamžiku před zapálením fúzních reakcí vystačí pouze se samoohřevem. Stejně jako když zapalujeme táborový oheň. Nejprve škrtneme sirkou a později již dřevo hoří „samo“ Obr. 1-2.

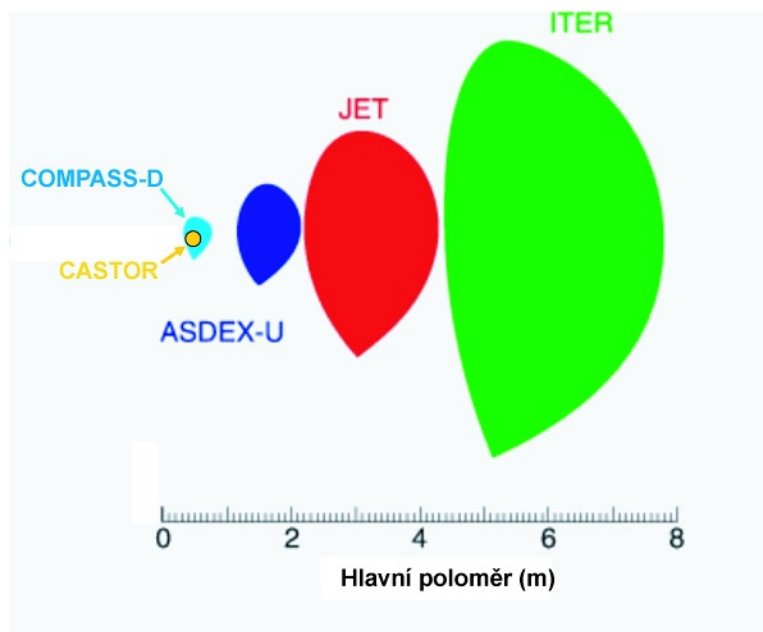


Obr. 1-2 Ohřev a tvarování plazmatu: vlevo jsou vidět dva význačné směry v komoře tokamaku: toroidální a poloidální a vpravo jsou vyobrazeny tři metody vnějšího ohřevu plazmatu v tokamaku: základní ohmický a dodatečný s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem, respektive s vstřikem svazku vysokoenergetických neutrálních atomů [4]

Tab. 1-1 Přehled největších světových a evropských tokamaků [4].

název	stát	R_o [m]	a [m]	B_t [T]	I [MA]	Q
ITER	Mezinárodní	6,2	2	5,3	17	10
JET	EU	2,96	1,25	4	7	0,65
JT-60U	Japonsko	3,4	1	4,5	6	
TFTR	USA	2,62	0,97	5,9	3	0,25
DIII-D	USA	1,67	0,67	2,1	3	
MAST	Spoj. království	0,85	0,65	0,5	2	
ASDEX U	Německo	1,65	0,8	3,9	2	
ToreSupra	Francie	2,25	0,7	4,5	2	
T-15	Rusko	2,43	0,7	3,5	2	
KSTAR	Korea	1,8	0,5	3,5	2	
Alcator C-mod	USA	0,67	0,22	8,07	1,5	
HT-7U	Čína	1,75	0,4	4	1,5	
TCV	Švýcarsko	0,88	0,24/1,39	1,43	1,2	
FT-U	Itálie	0,92	0,31	7,5	1,2	
NSTX	USA	0,85	0,67	0,6	1	
TEXTOR	Německo	1,75	0,5	2,8	0,8	
Alcator C	USA	0,64	0,16	13	0,8	
TRIAM-1M	Japonsko	0,8	0,12/0,18	8	0,42	
SST-1	Indie	1,1	0,2	3	0,22	
HL-1	Čína	1,02	0,2	5	0,135	
T-10	Rusko	1,5	0,39	5	0,45	
CASTOR	Česko	0,4	0,1	1,5	0,025	

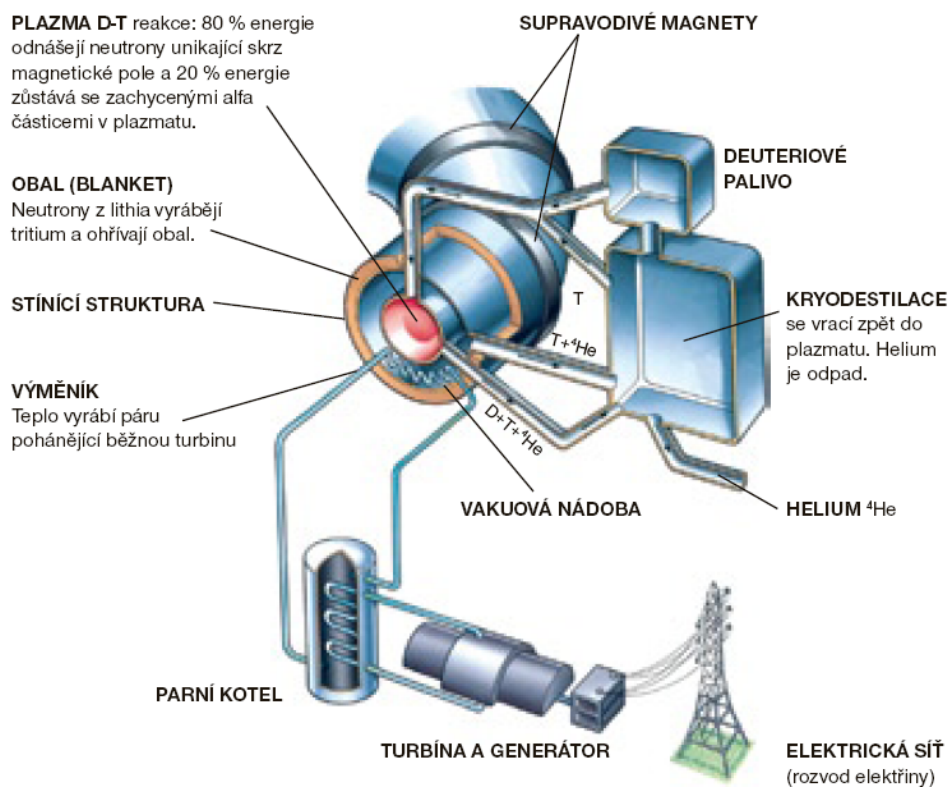
R_o = hlavní poloměr, a = vedlejší poloměr, B_t = magnetické pole, I = elektrický proud, Q = poměr fúzního výkonu k výkonu dodatečného ohřevu (u ITER uvedena projektová hodnota, u JET a TFTR dosažená rekordní hodnota)



Obr. 1-3 Srovnání velikostí současných tokamaků s geometrií plazmatu podobných ITERu [7]

Nyní je Tokamak COMPASS D přepraven z Culhamu do Prahy, aby naši vědci na něm dále prováděly pokusy a výzkumy. V Culhamu byla blízko elektrárna a tedy s napájením nebyl žádný problém a impulsy spotřebované Tokamakem nezpůsobovaly poklesy v síti... Ale po převozu do Prahy se Tokamak bude nacházet téměř v centru Prahy, kde není možnost přímého napájení, ať už potřebné frekvence, či nárazových proudů a napětí. Proto se musel vymyslet nový systém napájení. Ten se bude skládat ze dvou generátorů, které budou dodávat vysoké impulsy po určitý čas cca 0,5s pro napájení Tokamaku Compass D a potřebné frekvence. K tomu napomůžou transformátory a měniče napětí, které jsou pro každou cívku specifické.

První termojaderná elektrárna je plánovaná na rok 2050. Obr. 1-4



Obr. 1-4 schéma termojaderné elektrárny [4]

Věřím, že moje práce bude nápomocná těm, kteří chtějí danému problému porozumět, a současně bude úvodem do studia těm, co se mu chtějí věnovat hlouběji třeba i na profesionální úrovni.

2 CÍLE PRÁCE

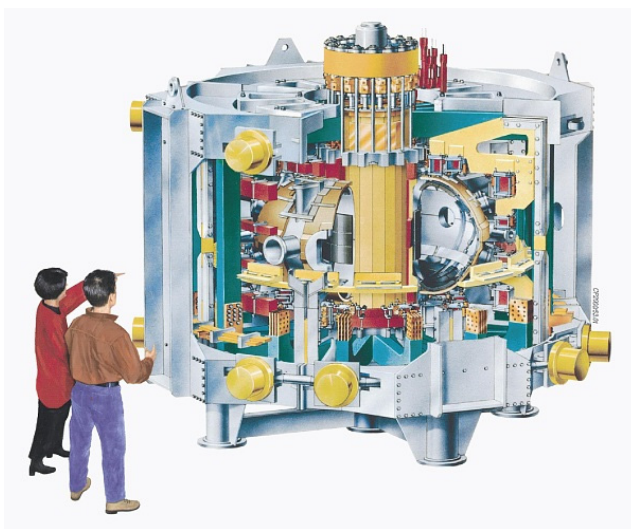
Seznámit čtenáře z méně známou problematikou termojaderné syntézy využívající tokamak. S tokamakem samotným, s jeho minulostí, budoucností i s jeho konstrukční vyspělostí. Tedy blíže popsat tento vynález k jeho funkčnímu pochopení.

3 POPIS TECHNOLOGICKÉHO VYBAVENÍ PRO NAPÁJENÍ TOKAMAKU COMPASS D A ELEKTRICKÉ SÍTĚ S PULZNÍMI GENERÁTORY

3.1 Blok tokamaku COMPASS D

3.1.1 Historie

COMPASS (COMPact ASSEMBly) tokamak byl zkonstruován v 80. letech ve výzkumném centru v Culhamu v Anglii jako flexibilní tokamak především pro studium fyziky plazmatu s kruhovým a „D“ průřezem.



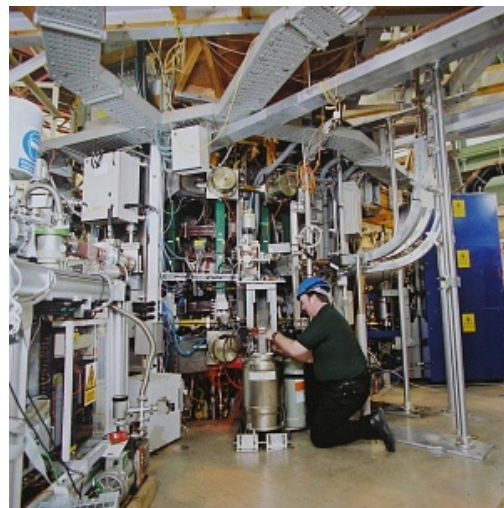
Obr. 3-1 náčrt tokamaku COMPASS D [7]

První plazma bylo zapáleno v roce 1989 v konfiguraci s vakuovou komorou kruhového průřezu. Prováděly se v něm průkopnické experimenty například s cívkami pro korekci magnetického pole pro ITER a experimenty s neinduktivním vlečením proudu v plazmatu.

V roce 1992 byl znovu spuštěn s vakuovou komorou ve tvaru D. Byl dosažen výbojový režim s vyšším udržením plazmatu (H-mód), který bude využíván jako referenční režim na tokamaku ITER

V Česku byl do konce roku 2006 v provozu malý tokamak CASTOR v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky postavený koncem 50. let 20. století v Kurčatovském ústavu v Moskvě a převezený do Československa v roce 1977. Bude

nahrazen modernějším a větším tokamakem COMPASS, který byl na podzim roku 2004 nabídnut anglickou agenturou pro atomovou energii UKAEA českému Ústavu fyziky plazmatu k bezúplatnému převodu. V anglickém Culhamu poblíž Oxfordu byl v provozu v letech 1992-2001. Tokamak COMPASS má divertorovou konfiguraci magnetického pole. Tvarem a velikostí plazmatu je vůči ITERu přibližně 1:10. Jedná se o tokamak s možností dosažení výbojů s vyšším udržením částic a energie, tzv. H-módu.



Obr. 3-2 pohled na tokamak shora obr. vlevo a z boku v 1. patře obr. Vpravo [7]

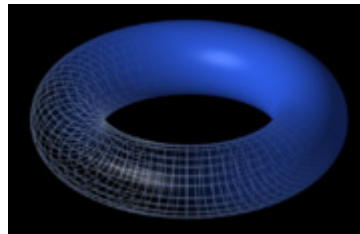


Obr. 3-3 pohled pod tokamak v přízemí [7]

3.1.2 Popis funkce a systém cívek Tokamaku

Tokamak je pokusné zařízení pro vytvoření vodíkového plazmatu o vysoké teplotě. Je to vlastně transformátor, jehož sekundární vinutí tvoří jeden závit vodivého plazmatu. Plazma je látka s teplotou kolem stovek milionů stupňů. Je vytvořena termojadernou energií, která se uvolňuje při sloučení jader lehkých atomů, jsou-li ohřána na potřebnou zmiňovanou teplotu. Aby plazma fungovalo po potřebnou dobu a nevychladlo dotykem se stěnou nádoby, je použit systém cívek okolo anuloidu, který vytváří magnetické pole vhodného tvaru, které tvoří izolaci. Někde je tento proces nazýván „magnetické udržení“. To vše se děje v nádobě s tvarem anuloidu. Plazma se někdy považuje za 4. skupenství hmoty. Předpokládá se, že tokamak Compass-D bude schopný vytvářet výboj plazmatu po dobu cca 0.5 - 1 s. Spotřeba energie bude do ~ 80 MJ a špičkový příkon do ~ 60 MW.

Tokamak je vybaven dvěma základními systémy cívek. První systém je toroidní vinutí, které vytváří magnetické pole ve směru toroidní vakuové nádoby (TF = toroidal field). Tento systém je tvořen 16-ti měděnými cívkami, každá po 4 závitěch chlazených vodou, rozmístěnými rovnoměrně, „navlečenými“ do kruhu na anuloid vakuové komory.



Obr. 3-4 anuloid [5]

Druhý systém cívek tokamaku tvoří cívky poloidální. Jsou to cívky, které jsou koncentrované na hlavní osu toroidální vakuové nádoby a jejich geometrické uspořádání je určeno funkcí, kterou má jednotlivé vinutí zastávat.

3.1.2.1 magnetizační vinutí (OH / MFPS)

Budící vinutí tokamaku (transformátoru, kde sekundární vinutí je tvořeno vakuovou komorou ve tvaru anuloidu, ve které dochází během pracovního pulsu k výboji průrazem a následnou ionizací pracovního plynu). Toto vinutí je tvořeno ze dvou systémů cívek zapojených v sérii - centrálního solenoidu a cívek nad a pod vakuovou nádobou.

Vinutí je napájeno v obou polaritách. V první části ohmického ohřevu (OH start) = záporné hodnoty proudu, se v transformátoru nashromáždí energie a pak se zapálí a vybuduje plazmový výboj. To se stane po dosažení proudu v magnetizačním vinutí cca 18 kA, kdy se proud začne kontrolovaným způsobem snižovat až po průchod nulou. Během poklesu proudu jeho dostatečně rychlá změna v čase indukuje ve vakuové

komoře dostatečné napětí U_{loop} , které způsobí lavinový průraz a zapálení plazmového výboje.

Po průchodu nulou se ke stejnému vinutí připíná druhý zdroj (MFPS), který je regulován na stálý gradient nárůstu proudu magnetizačním vinutím. Tento stav odpovídá indukci stálého napětí na závitě plazmového výboje, které udržuje požadovanou stacionární hodnotu proudu plazmatu v rozmezí 150 – 400 kA. Po dosažení stanovené doby výboj kontrolovaným způsobem zaniká.

3.1.2.2 rovnovážné vinutí (zdroj EFPS)

Vinutí udržující polohu plazmového závitě (závisící na parametrech plazmatu) v geometrickém středu vakuové nádoby.

3.1.2.3 tvarovací vinutí (zdroj SFPS)

Toto vinutí vytváří požadovaný tvar plazmatu v jeho příčném řezu, kolmém na stěnu nádoby.

3.1.2.4 rychlé zpětnovazební vinutí (zdroj FFPS)

Potlačuje rychlý pohyb plazmatu uvnitř vakuové komory. Vyžaduje nižší výkon, ale je schopné podchytit rychlejší změny v porovnání s EFPS.

3.1.3 Energetická bilance tokamaku

Compass-D lze provozovat v širokém rozsahu toroidálních magnetických polí (TF) 0.8 – 2.1 T. Délka výboje je limitována především zahříváním cívek. Při maximálním TF = 2.1 T je délka výboje maximálně 0.5 s (flat-top fáze).

Napájení TF má v energetické bilanci tokamaku určující roli, protože tvoří přibližně 50 % spotřeby celého systému.

Dva synchronní generátory napájení dovolí alternativně používat buď jen jeden generátor při provozu s toroidálním polem TF ≤ 1.2 T nebo oba generátory současně při vyšším toroidálním poli.

Celkové energetické bilance při sníženém a maximálním toroidálním poli jsou uvedeny v následujících tabulkách.

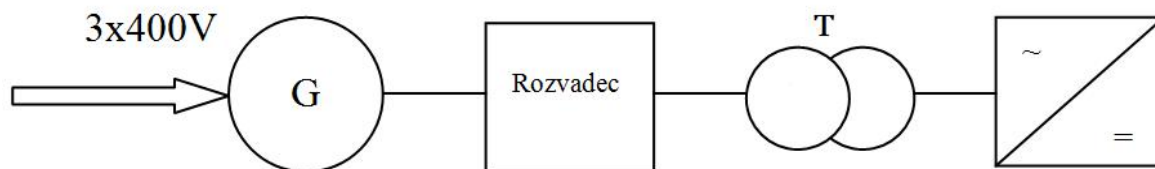
Tab. 3-1 toroidální pole 1,2 T / délka výboje cca 1 sec [8]

Druh spotřeby	Napět'ová úroveň	Požadovaný činný výkon	Spotřeba energie na jeden výboj
Toroidální pole	450V DC	9.0 MW	18.0 MJ
OH start	850 V DC	9.0 MW	2.0 MJ
MFPS, EFPS, SFPS	265 - 650 V DC	13.0 MW	10.0 MJ
FFPS	±50 V DC	1.5 MW	1.5 MJ
Experim. zesilovače	±45 V DC	0.5 MW	0.5 MJ
Dodatečný ohřev	3 x 400 AC	3.0 MW	2.0 MJ
Celkem		27.0 MW (špičkově)	34.0 MJ

Tab. 3-2 toroidální pole 2,1 T / délka výboje cca 0.5 sec [8]

Druh spotřeby	Napět'ová úroveň	Požadovaný činný výkon	Spotřeba energie na jeden výboj
Toroidální pole	450V DC	27.0 MW	40.0 MJ
OH start	850 V DC	9.0 MW	2.0 MJ
MFPS, EFPS, SFPS	265 - 650 V DC	20.0 MW	16.0 MJ
FFPS	±50 V DC	1.5 MW	1.5 MJ
Experim. zesilovače	±45 V DC	0.5 MW	0.5 MJ
Dodatečný ohřev	3 x 400 AC	3.0 MW	2.0 MJ
Celkem		52.0 MW (špičkově)	62.0 MJ

3.2 Blok napájení Tokamaku Compass D



Obr. 3-5 blokové schéma napájení cívek Tokamaku přes generátor, rozvaděč, transformátor a měnič

3.2.1 Rozvaděče sítě

Rozvádí energii systémem generátorů a setrvačnicků do obvodu napájení cívek tokamaku přes transformátory. Budou navrženy na napětí 6 kV o frekvenčním rozsahu 85-65 Hz se dvěma systémy sběrnic. Nacházet se budou v přízemí hlavní technologické budovy. Generátory bude možno připojit na vstup obou systémů sběrnic přes výkonový vypínač. Na oba systémy sběrnic bude také možno připojit transformátory pro napájení toroidálního vinutí. Vývody pro jednotlivé transformátory silových měničů budou kromě jiného (např. měřicí transformátory v každé fázi, ochrany, měření a blokování ve vazbě na napájené měniče) vybaveny odpojovačem v kombinaci se zemnicím spínačem. Elektrické ochrany generátorů musí být schopny vyhodnotit a odlišit poruchový stav od normálního pulzního provozu generátorů, vypnout vypínač na přívodu do VN rozvaděče a zajistit odbuzení generátoru v případě poruchy.

3.2.2 Transformátory

Napájecí soustava tokamaku pracuje na několika napěťových úrovních. Výchozí napájecí soustava je přívod z veřejné sítě PRE 22kV, 50Hz.

- **Transformátory T01 a T02** jsou oddělovací izolační transformátory. Tyto transformátory budou sloužit pro napájení zařízení oddělených od rozvodu 0.4 kV. T01 bude napájet zařízení přímo připojená k tokamaku (diagnostiky) a T02 bude pro ty obvody výkonových měničů které vyžadují trvalé napájení.

- **Transformátory T2A a T2B**, pro napájení budících měničů synchronních generátorů. Na buzení synchronních generátorů budou kladeny vysoké požadavky, neboť se předpokládá vysoký pulsní výkon činného i jalového charakteru. Proto vzhledem k omezené kapacitě připojovacího místa vnější sítě VN budou budící agregáty obou synchronních generátorů napájeny ze sítě 6kV/85-65Hz
- **Transformátory T3A a T3B**, pro napájení tyristorových měničů toroidálního vinutí. Tyto dva trojvinutové transformátory budou sloužit k napájení 2 x 2 ks dvanácti-pulsních měničů
- **Transformátor T4**, pro napájení tyristorových měničů rovnovážného vinutí – EFPS. Tento trojvinutový transformátor bude sloužit k napájení dvanácti-pulsního měniče pro EFPS vinutí tokamaky
- **Transformátor T5**, pro napájení tyristorových měničů tvarovacího vinutí SFPS. Tento trojvinutový transformátor bude sloužit k napájení dvanácti-pulsního měniče pro SFPS vinutí tokajsky
- **Transformátory T6 a T7**, pro napájení tyristorových měničů magnetizačního vinutí OH/MFPS, trojvinutový transformátor (T6) pro napájení dvanácti-pulsního měniče DC 650V, trojvinutový transformátor (T7) pro napájení dvanácti-pulsního měniče DC 850V
- **Transformátor T8**, pro napájení zdrojů zesilovačů. Transformátor T8 bude napájet zesilovače pro vinutí FFPS a zdroje proudu pro sedlové cívky.
- **Transformátory T9, T10**, pro napájení systému pro vstřík neutrálních atomů (NBI) a klystronů pro mikrovlnný ohřev. Transformátor T9 bude napájet vysokonapěťové zdroje dvou systémů ohřevu plazmatu neutrálními svazky po dobu max. 500ms. Transformátor T10 bude napájet vysokonapěťové zdroje dvou mikrovlnných generátorů po dobu max. 500ms.

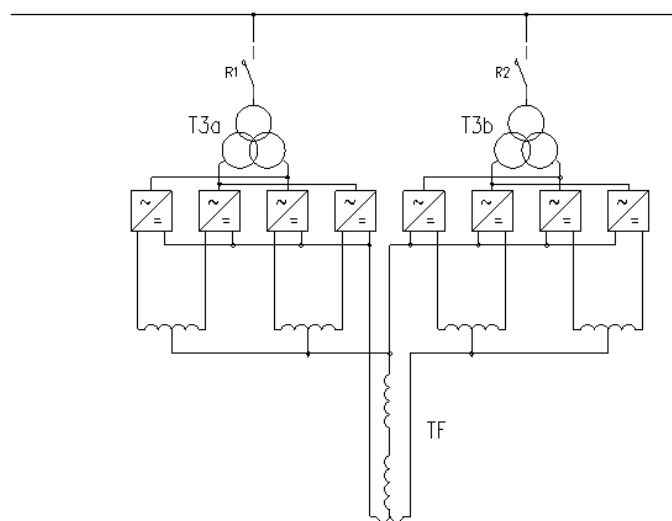
3.2.3 Stejnoseměrné měniče

Všechny napájecí měniče jsou napájeny z transformátorů uvedených v předchozí kapitole. Jedná se o tyristorové měniče. Budou sloužit pro napájení přímo vinutí tokamaku.

Napájeny budou dvě hlavní vinutí:

3.2.3.1 Toroidální vinutí Obr. 3-6

Jedná se o dva + dva dvoukvadrantové tyristorové měniče zapojené paralelně s oddělovacími tlumivkami. Musí být zajištěna požadovaná křivka náběhu proudu, udržení předdefinovaného proudu a po skončení výboje odbuzení cívky.



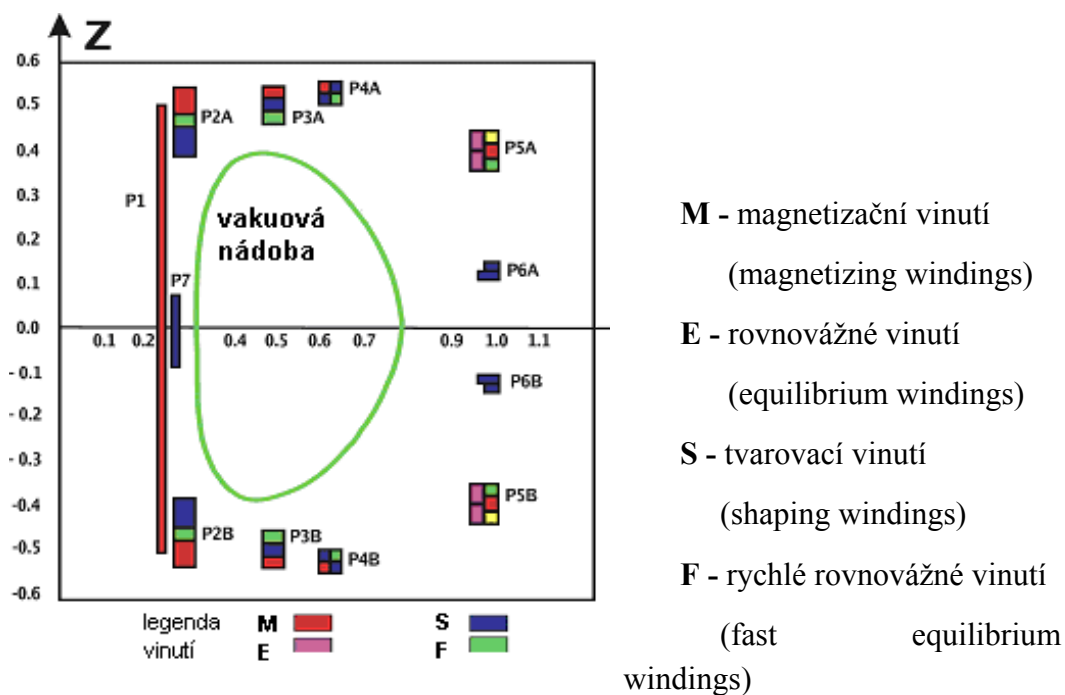
Obr. 3-6 obvod toroidálního vinutí [8]

Pro tento případ bude sloužit

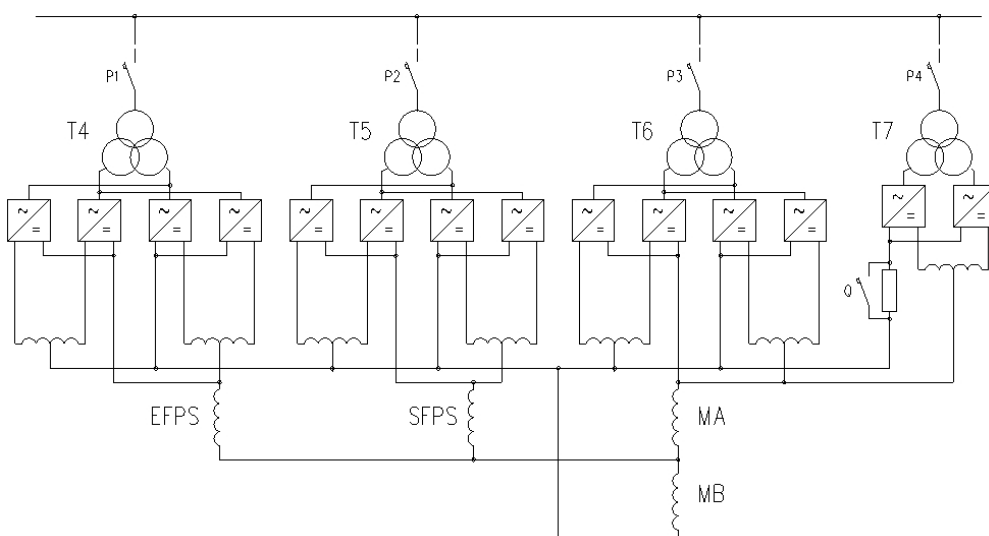
- **měníč pro toroidální vinutí**

3.2.3.2 Poloidální vinutí Obr. 3-7

Poloidální vinutí je tvořeno systémem cívek dle následujícího obrázku *Obr. 3-8*. Jednotlivá vinutí jsou spojena galvanicky a napájena z tyristorových měničů. Kromě galvanické vazby jsou mezi jednotlivými cívkami i vazby induktivní. Každé z vinutí má tedy definován odpor, vlastní indukčnost a vzájemnou indukčnost k ostatním vinutím. Každé vinutí se skládá z několika sekcí, které je možno spojovat do různých kombinací přes propojovací pole. Parametry vinutí jsou tedy proměnné v určitém rozsahu. Zapojení cívek se tedy bude měnit podle potřeb experimentů, a to nejvíce u S -cívek.



Obr. 3-7 poloidální vinutí [8]



Obr. 3-8 obvody poloidálních vinutí [8]

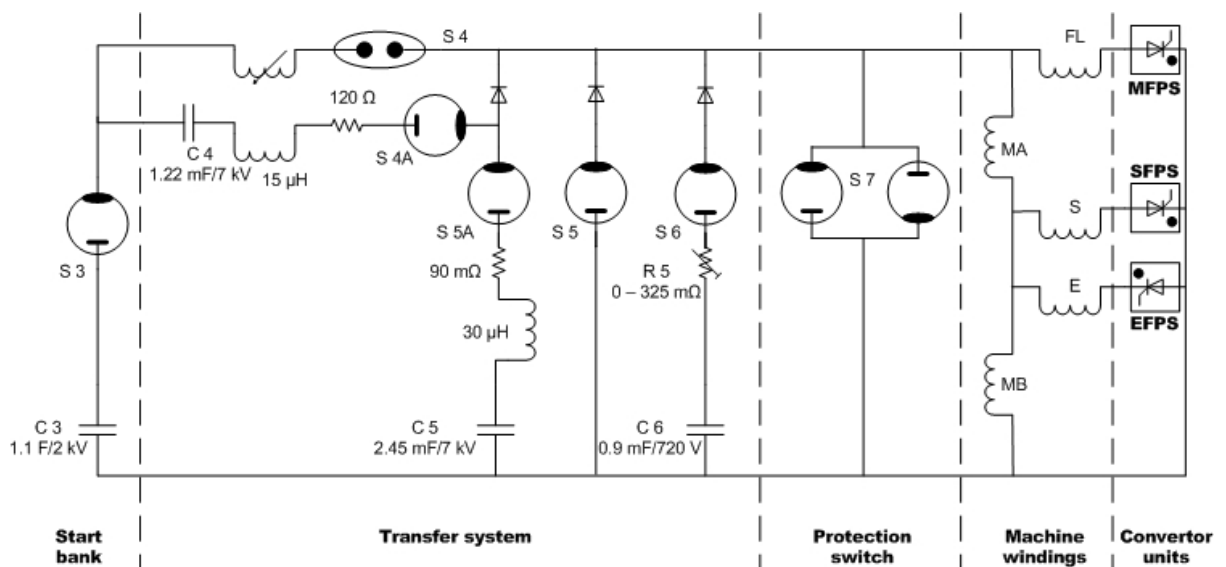
- **Měnič pro vinutí EFPS:** rovnovážné vinutí
- **Měnič pro vinutí SFPS:** tvarovací vinutí

Původní řešení obvodu zapálení (OH-start) a udržení plazmatu (MFPS)

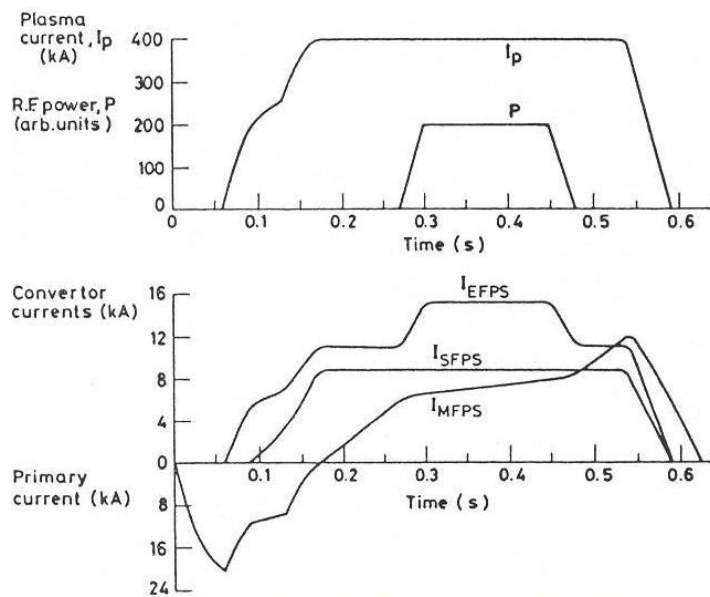
Popis původního řešení obvodu používaného v UKAEA Culham vysvětluje funkci magnetizačního obvodu tokamaku a zejména jednotlivé fáze při zapalování plazmatu. Tato operace trvala zhruba 100 ms a je to nejnáročnější část z hlediska pečlivého sladění jednotlivých fází. Při zapalování plazmatu, po předmagnetizaci primárních cívek MA + MB z kondenzátorové baterie, dojde k přepojení primárního obvodu, k lavinovitému průrazu výboje a převedení energie primárních cívek na rychlý ohřev a vybudování proudu plazmatu.

Zjednodušené schéma obvodu s poloidálními cívkami používaného v UKAEA Culham je na *Obr. 3-9.* a idealizované průběhy proudů na *Obr. 3-10,* ve kterém je naznačen i vliv dodatečného ohřevu plazmatu. Rovnovážné (E) a tvarovací (S) cívky jsou propojeny s magnetizačními cívkami a tak cívkou MB prochází proudy ze všech tří zdrojů. Cívky a vzájemné vazby mezi nimi jsou navrženy tak aby se co nejlépe kompenzovalo rušivé magnetické pole uvnitř vakuové nádoby a to i při změnách magnetizačního proudu.

Obvod OH-start se sestával z vysokonapěťových kondenzátorových baterií, vakuových přerušovačů (20 kA / 8 kV) a ignitronů. Jeho funkce má čtyři dále popsané fáze, na grafu magnetizačního proudu je to záporná větev. V kladné větvi, která má další dvě fáze, je pak magnetizační proud ovládán zdrojem MFPS. Všechny spínače jsou na počátku rozpojené a kondenzátory C3, C4 a C5 nabité.



Obr. 3-9 Zjednodušený obvod poloidálních polí [8]



Obr. 3-10 Idealizované průběhy proudů [8]

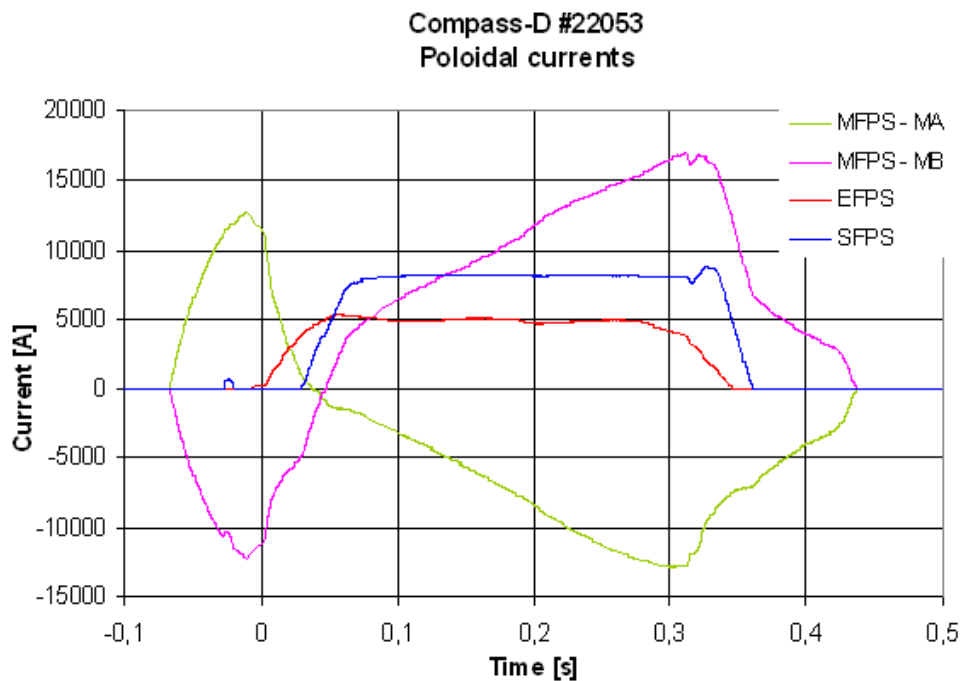
- a) Předmagnetizace - Sepnutím S3 a S4 teče z C3 magnetizační proud do cívek MA + MB a vytváří záporný magnetický tok – 0.4 Vs.
- b) Vytvoření kruhového plazmatu - když proud v cívkách dosáhne hodnoty kolem –18 kA, otevře se vakuový rozpojovač S4. Sepnutím ignitronu S4A se z kondenzátoru C4 vytvoří protiproud na zhasnutí výboje v S4. Současně se sepne S6 který převede proud z cívek do R5 / C6 členu. Rychlý pokles primárního proudu vytvoří dostatečné napětí na sekundárním závitě (kterým je vakuová komora). Pro Compass-D má být toto napětí $U_{loop} = 16 - 20$ V. S pomocí předionizace se spustí plasmový výboj a během 10 - 20 ms je vybudován proud plazmatu ~100 - 200 kA. Plasma začíná s kruhovým průřezem. Zdroj EPFS je uveden do provozu pro stabilizaci polohy plazmatu.
- c) Tvarování plazmatu - S5 se sepne a S6 rozepne, čímž se stabilizuje změna primárního proudu a tedy i proud plazmatu. Zdroj SFPS je uveden do provozu a během ~ 20 ÷ 40 ms se vytvoří požadovaný průřez proudu plazmatu (např. D tvar).
- d) Časový vývoj plazmatu - S5 se znovu rozepne (k tomu napomáhá sepnutí S5A) a S6 znovu sepne, čímž dochází k dalšímu rychlému poklesu primárního proudu k nule a zvyšuje se proud plazmatu
- e) Udržování proudu plazmatem - po průchodu nulou zdroj MFPS udržuje konstantní nebo jiný stanovený proud plazmatu po stanovenou dobu.
- f) Ukončení výboje - přívod pracovního plynu je uzavřen a měnič MFPS přejde do invertorového režimu. Během 50 ÷ 100 ms proud a hustota plazmatu poklesne na bezpečnou úroveň a výboj zhasne.

Požadované řešení pro OH / MFPS systémy:

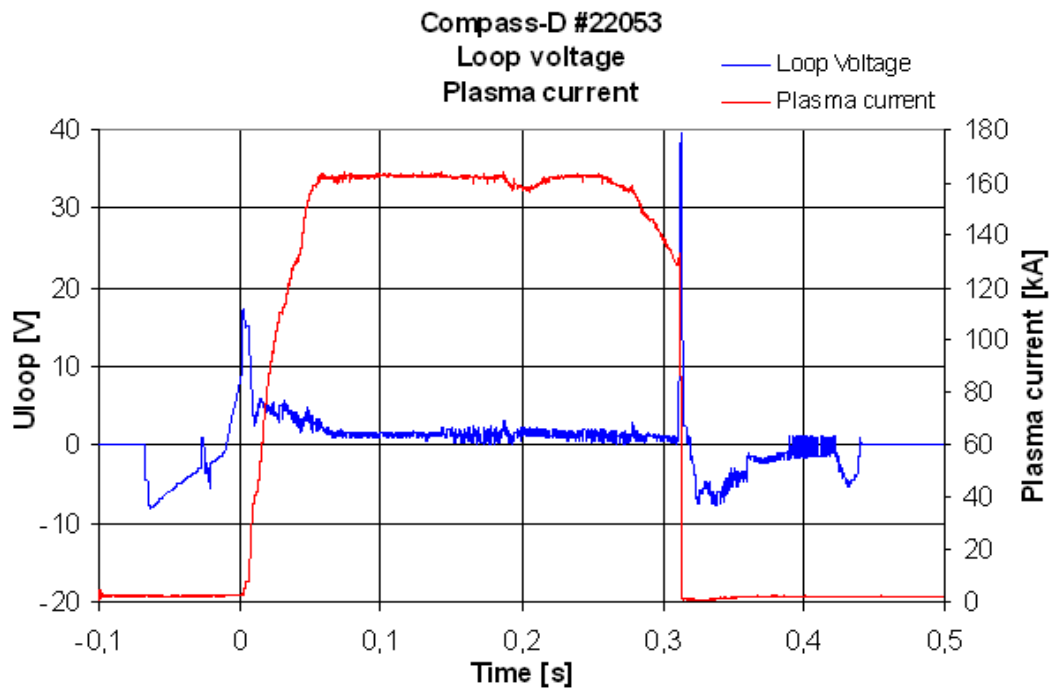
- **Měnič pro vinutí OH / MFPS:** magnetizační vinutí

Požadovaná varianta je založena na plně elektronickém řešení. Hlavní kondenzátorová baterie je v ní nahrazena tyristorovým měničem. Potřebného poklesu primárního proudu ($dI/dt \sim 9 \times 10^5$ A/s) se dosáhne přechodem měniče do invertorového chodu spolu s vřazením vhodného odporu do primárního obvodu. Obvod OH/MFPS se tedy bude skládat ze dvou dvoukvadrantových měničů na rozdílná napětí a zatížení v kombinaci s elektronickým spínačem/rozpínačem pro vřazení odporu.

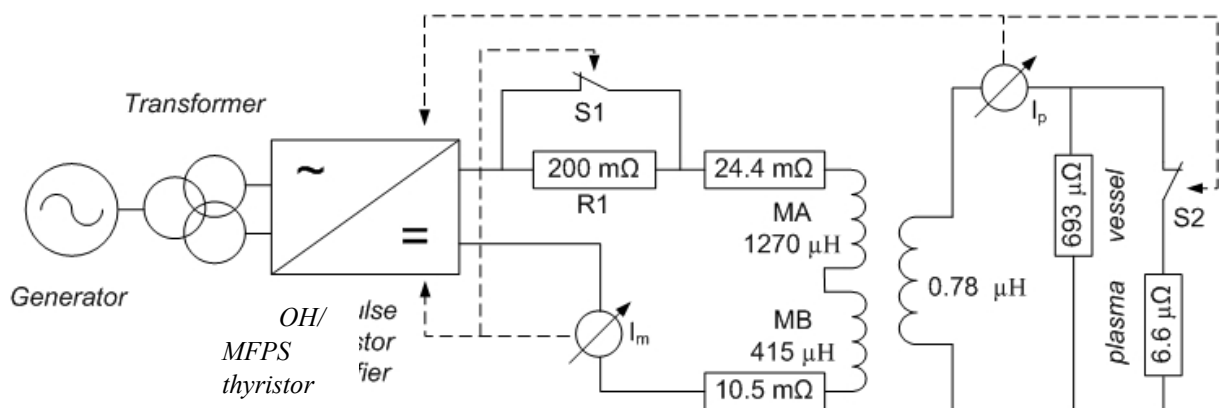
Obr. 3-11 ukazuje typické reálné průběhy hlavních poloidálních proudů. Proud cívky MB je vykreslen s opačnou polaritou pro lepší odlišení od proudu cívky MA. Velikost poloidálních proudů závisí především na toroidálním poli a proudu plazmatu zvoleném pro daný experiment. V tomto případě byly zvoleny TF proud 80 kA a proud plazmatu 160 kA. Průběhy napětí na závit (= vakuové komoře / prstenci plazmatu) spolu s proudem plazmatu jsou na *Obr. 3-12*.



Obr. 3-11 Reálné průběhy poloidálních proudů, výboj #22053 [8]



Obr. 3-12 Reálné průběhy napětí na závit a proudu plazmatu, výboj #22053 [8]

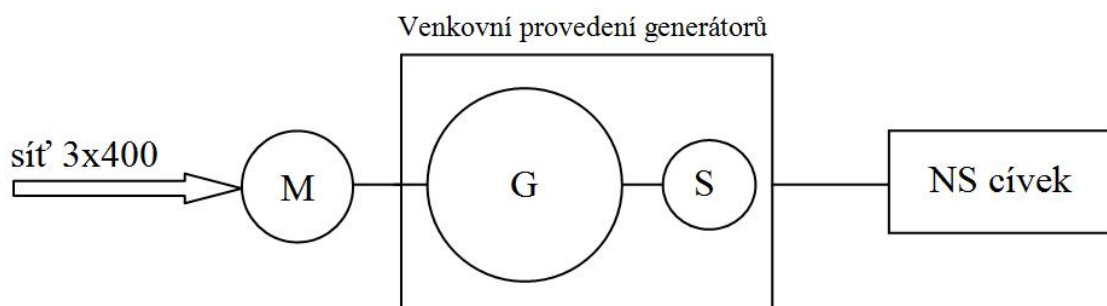


Obr. 3-13 Schéma obvodu OH start [8]

Obr. 3-13 ukazuje zjednodušené schéma pro obvod OH-start s řízeným měničem a vloženým odporem R1. Na počátku je spínač S1 sepnutý a zkratuje odpor R1. Měnič magnetizuje primární cívky MA a MB. Když proud I_m dosáhne $\sim 16 - 18$ kA, měnič přejde do invertorového režimu a proud začne klesat. Otevřením S1 je do obvodu vřazen odpor R1. Tím se pokles proudu urychlí a dosáhne takové hodnoty, že na sekundárním závitě se naindukují $U_{loop} \sim 16 - 20$ V při kterém dojde k zapálení plazmatu. Odpor R1 bude mít variabilitu $\pm 50\%$. Spínač S1 je nutné řešit elektronicky na bázi tyristoru, IGCT nebo ETO s těmito parametry:

Max. proud	~	18 kA, obousměrný
Max. napětí	~	4 kV (s bezpečnostním faktorem min. 2.5)
I^2t	~	$23 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ ve fázi před plazmatem
I^2t	~	$72 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ ve fázi s plazmatem

3.2.4 Akumulace energie (Generátory + setrvačníky) Obr. 3-14



Obr. 3-14 blokové znázornění akumulace energie – přes motor napájený generátor se setrvačníkem do napájecího systému cívek

Tokamak Compass-D byl v provozu v laboratořích Culham, Anglie v letech 1989-2001. Byl napájen přímo ze sítě vysokého napětí v místě dostatečné kapacity výkonu přenosové soustavy. Pro řízení proudů v jednotlivých vinutích tokamaku byly použity výkonové tyristorové měniče.

Tokamak Compass-D, bez napájecích zdrojů, bude přemístěn do Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v Praze. Navrhované řešení zdrojů se v některých aspektech odlišuje od původních zdrojů. Na místě opětne instalace, je totiž k dispozici napájecí bod vysokého napětí 22kV, avšak pouze s maximální kapacitou odběru 1 MW

Tato skutečnost je z pohledu řešení napájecího systému tokamaku podstatná a přináší nutnost postavit napájecí zdroj jako zdroj akumulační. To znamená, že během přípravy k pokusnému výboji tokamaku se energie ze sítě, čerpaná při maximálním momentálním příkonu do 1MW, akumuluje tak, aby celková nashromážděná energie pokryla energetickou spotřebu jednoho výboje tokamaku. Celková potřebná energie jednoho pulsu bude v rozmezí 30 až 80 MJ v závislosti na zvoleném toroidálním magnetickém poli a délce impulsu.

Akumulování mechanické energie je prováděno pomocí dvou rotačních synchronních generátorů v provedení venkovní kontejner. Tyto kontejnery budou umístěny mimo budovu tokamaku na zpevněné ploše (betonové desce s adekvátními parametry) a budou zvukotěsné.

Soustrojí bude vybaveno setrvačником pro zajištění energetické potřeby tokamaku s dostatečnou rezervou a v požadovaném rozsahu výstupní frekvence.

Roztočení generátoru na pracovní otáčky a stejně jako opětné urychlení soustrojí po ukončení pulzního výboje tokamaku bude prováděno pomocí roztáčecího elektromotoru, napájeného ze sítě NN 3x 400V/50Hz přes frekvenční měnič. Tyto rozběhové frekvenční měniče pro soustrojí se 4 až 6 pólovými synchronními generátory stejně jako roztáčecí elektromotory s frekvenčním měničem o výkonu cca 100 až 200 kW na 3x400 V jsou také součástí dodávky. Řízení chodu, včetně veškerého příslušenství ovládáno dálkově a monitorováno z budovy tokamaku. Ochrana generátorů bude na jejich vývodech realizována hlavním vypínačem, dimenzovaným dle zkratových poměrů generátorů a podle tepelného zatížení daného proudem pracovního impulsu tokamaku a délkou pulsu danou akumulovanou energií. Vedení, které bude spojovat svorky generátoru k hlavnímu vypínači musí být provedeno tak, že za žádných okolností nemůže dojít ke zkratu, který by zničil generátor. Generátor a spojovací vedení do rozvaděče VN bude chráněno jako celek diferenciální ochranou, případně dalšími nutnými ochranami.

Budící obvody budou napájeny ze statických měničů. Pro nabuzení stroje a testy bez zatížení bude používán jeden budič napájený z vnější sítě 400V/50Hz. Druhý budič bude přes transformátor napájet budící vinutí z generované sítě 6kV/85-65Hz. Oba budící zdroje budou opatřeny regulací na konstantní napětí generátoru, druhý zdroj pro práci pod zatížením musí umožňovat nárazové přibuzení při změnách zátěže.

Dynamika nárazového přibuzení musí být dostatečná pro očekávané změny zátěže, aby nebylo překročeno dovolené kolísání výstupního napětí.

Mazací okruh bude schopný zajistit doběh soustrojí při ztrátě napájení z vnější sítě bez poškození stroje.

Každý generátor bude pracovat samostatně bez požadavku na vzájemnou synchronizaci

3.3 Blok systému řízení *Obr. 3-15*

Řídicí systém tokamaku COMPASS (CODAS, Control and Data Acquisition System) bude vystavěn modulárně. Centrální řídicí systém bude využívat jazyku java a bude komunikovat s jednotlivými moduly, které budou mít popis ve formátu XML.

Terminologie:

Centrální řídicí systém – nejvyšší úroveň řízení tokamaku a systému pro sběr dat; komunikuje se všemi podřízenými subsystémy, tj. moduly řídicího systému

Moduly řídicího systému – autonomní subsystémy centrálního systému, zajišťující fungování určitých funkčních celků; musí umožňovat samostatný provoz daného celku stejně tak jako předání řízení na nadřazenou úroveň (centrální systém)

3.3.1 Moduly řídicího systému

Tyto moduly musí být schopny autonomního provozu pro účely

- a) testování odpovídajících subsystémů (funkčních celků) a diagnostiku jejich provozu,
- b) zajištění funkce subsystémů a jejich uvedení do zabezpečeného stavu v případě ztráty spojení s centrálním systémem.

Dále je nezbytné, aby moduly řídicího systému umožňovaly a zajišťovaly:

- bezpečný provoz a fungování technologických ochranných bloků a blokování, včetně vazeb mezi jednotlivými bloky,
- hierarchii ovládání: lokální ovládání funkčních celků, resp. předání řízení na vyšší úroveň,
- monitorování ovládacích povelů.

Tyto principy musí být uplatněny i v případě řízení segmentu „energetiky“. Pro „energetiku“ jsou vyžadovány subsystémy, které umožní přehledné nastavení všech elementů (generátory, rozvaděče, transformátorů, měniče a ochrany).

V sekci „energetiky“ tokamaku budou následující moduly řídicího systému pro monitorování:

- 1) provozu generátorů sítě 6 kV
- 2) funkce vstupních rozvaděčů
- 3) funkce rozvodů 6 kV a měničů
- 4) průběhů proudů na výstupu „energetiky“

Pro každý z uvedených modulů je vyžadován řídicí panel.

3.3.2 Provoz subsystémů

Během provozu tokamaku musí být subsystémy schopné pracovat podle předem naprogramovaných algoritmů se současným zajištěním základních vazeb na centrální systém:

- a) signalizace stavu subsystému na nadřizenou úroveň –vypnuto / základní provozní režim („stand-by“) / příprava na pulz plazmatu (nabíjení) / připraven k pulzu (nabito) atd.; tj. z pohledu subsystému poskytnutí výstupní signalizace.
- b) schopnost reagovat na pokyn ke změně stavu ze strany centrálního systému – start přípravy na pulz / zastavení příprav – okamžité přerušení probíhajícího algoritmu a přechod na jiný algoritmus, zajišťující bezpečný stav / start pulzu atd.; tj. z pohledu subsystému přijímání a zpracování vstupních pokynů.

3.3.3 Nastavení algoritmů a ukládání nastavení

Nastavení algoritmů pro daný výboj musí být možné

- a) zadáním parametrů prostřednictvím řídicího panelu subsystému
- b) načtením nastavení použitého v zadaném předchozím výboji (načtení z databáze)

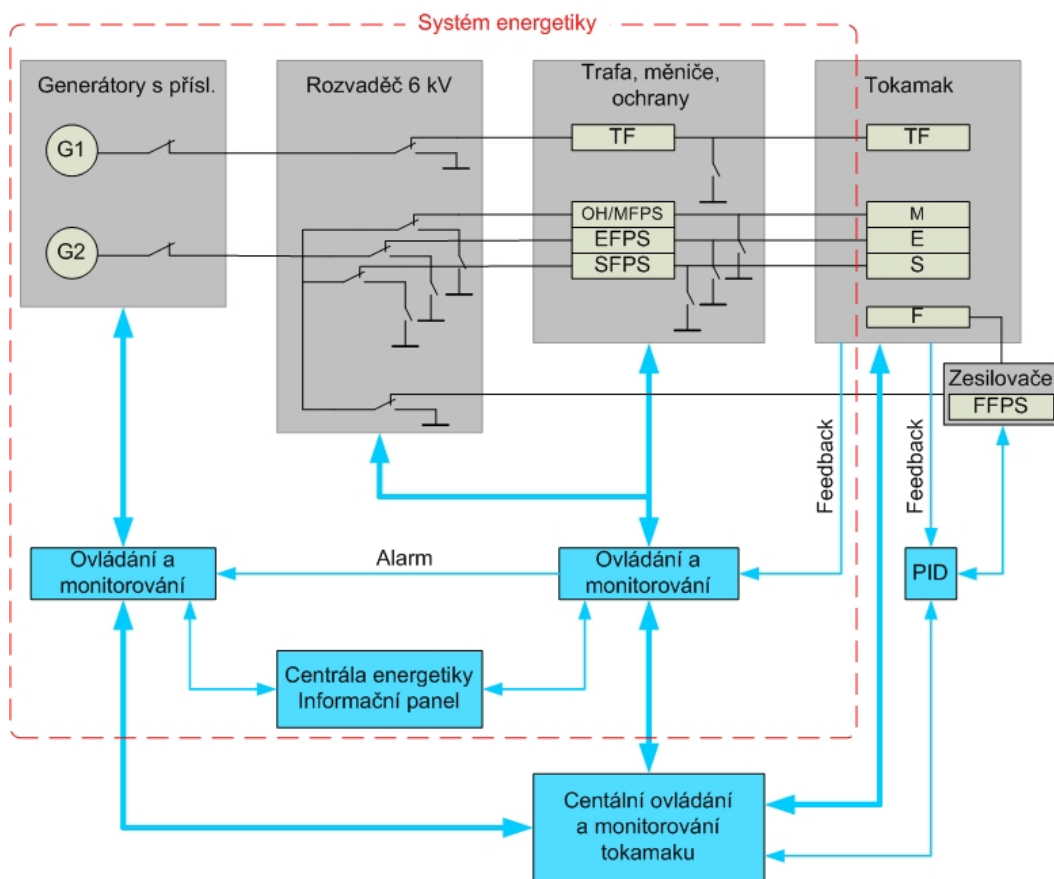
Parametry postačující k zopakování určitého nastavení musí být k dispozici v podobě datového souboru na výstupu tak, že mohou být zaznamenány centrálním systémem.

3.3.4 Monitorování provozu

Monitorovací a zobrazovací systém musí umožňovat ověření řádného provozu celého systému energetiky. V případě závad na systému musí umožnit jednoznačnou identifikaci příčin. Zároveň systém musí umožňovat záznam provozních parametrů v centrálním systému

- a) výstupem v podobě datového souboru
- b) analogovým výstupem napěťového signálu v rozmezí -5 V až +5 V.

Software řídicího, diagnostického a monitorovacího systému musí umožňovat dodatečné změny a úpravy funkce podle požadavků experimentů prováděných na TOKAMAKU



Obr. 3-15 přehledové schéma řídicího systému. Červená čára vyznačuje tu část systému, která je předmětem výběrového řízení [8]

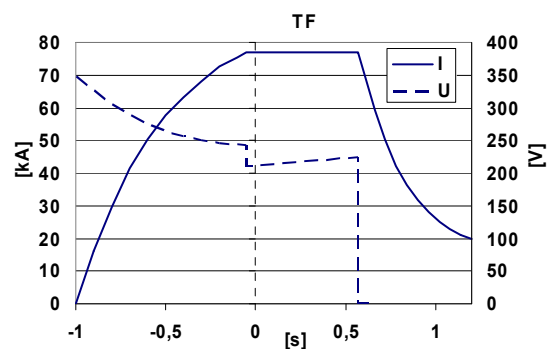
4 STANOVENÍ PARAMETRŮ NAPÁJECÍ SOUSTAVY TOKAMAKU

4.1 Parametry cívek Tokamaku

4.1.1 Parametry cívek toroidního vinutí. Příklad tvaru průběhu proudu během výboje

- pole 1.2 T, proud 52 kA, po dobu 1 s
příkon ~ 9 MW, energetický nárok ~ 18 MJ
- pole 2.1 T, proud 92 kA, po dobu 0.5 s
příkon ~ až 27 MW, energetický nárok ~ 40MJ

- rozsah napětí 150 – 450 V
- doba nárůstu a doběhu ~ 1 s
- opakovací frekvence 5x za hod



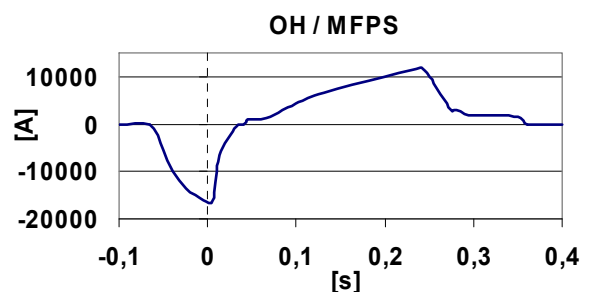
4.1.2 Parametry cívek poloidálních vinutí. Příklad tvaru průběhu proudu během výboje

OH / MFPS - magnetizační vinutí

vodou chlazené, 18x8 mm Cu,

transformační poměr 132:1

proud plazmatu 150 kA / 1 s, 250 kA / 0.5 s, s dodatečným ohřevem 250 - 400 kA / 0.3 s



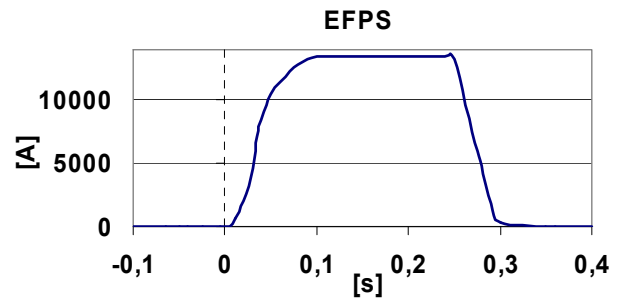
1. fáze - zapálení výboje

- 18kA pro nabuzení magnetizačního vinutí

- řízený pokles a průchod proudu nulou
- 2. fáze - proud rostoucí s definovaným gradientem pro udržení výboje,
- napětí zdroje 650 V, proud 0 – 12 kA, po dobu ≤ 1 s

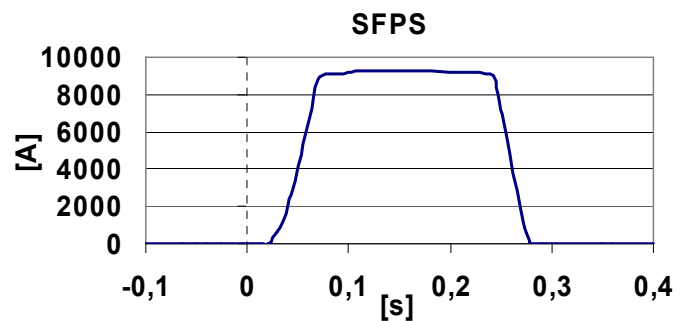
EFPS - rovnovážné vinutí

- vodou chlazené, 18x8 mm Cu
- zdroj 265 V, DC
- proud 7 kA, 1 s
- proud max. 16 kA, 0.5 s
- výkon ~ max. 5 MW
- spotřeba energie ~ max. 6 MJ



SFPS - tvarovací vinutí

- vodou chlazené, 18x8 mm Cu
- zdroj 540 V, DC
- proud 5 kA, 1 s
- proud max. 12 kA, 0.5 s
- výkon ~ max. 7 MW
- spotřeba energie ~ max. 6 MJ



4.2 Transformátory

4.2.1 Společné poznámky ke konstrukci transformátorů v síti 6kV/85Hz

- typ – suché
- pracovní frekvence 65 – 85 Hz
- transformátory pro ss měniče napájené ze sítě VN akumulacních zdrojů musí zajistit úplnou symetrii výstupních fázových napětí pro správnou funkci 12-ti pulsních měničů, vhodným zapojením primárního vinutí transformátoru a volbou hodinového úhlu
- Z důvodů omezení vzájemného ovlivňování měničů budou napájecí transformátory konstruovány tak, aby jejich napětí nakrátko bylo mezi 10 a 20 % při frekvenci 85 Hz.
- sekundární napětí naprázdno uvedená u dále specifikovaných transformátorů jsou za předpokladu napětí nakrátko 10%

- Transformátory T2 – T7 uvažujeme jako trojvinut'ové. Případně lze použít místo jednoho trojvinut'ového dva transformátory s vinutím primárního okruhu zapojeným do prodlouženého trojúhelníka a sekundárního okruhu symetricky s fázovým posunem +/- 15° oproti primárnímu.
- Všechny transformátory budou pracovat v impulsním režimu, proto je třeba při jejich návrhu uvážit stupeň přetížitelnosti oproti transformátorům dimenzovaným na trvalou zátěž.
- Odolnost proti zkratu - měniče nebudou chráněny pojistkami, takže v případě poruchy může nastat zkrat, jehož délka se předpokládá maximálně 300 ms (detekce poruchy → alarm → odpojení transformátorů). Transformátory, spoje a kabely musí být dostatečně odolné proti těmto poruchovým zkratům.

4.2.2 Požadavky pro jednotlivé transformátory:

○ Transformátory T01 a T02 – oddělovací izolační transformátory

- izolační transformátory 0.4 / 0.4 kV
- výkony 60 kW (T01) a 30 kW (T02)
- izolační napětí min. 4 kV

○ Transformátory T2A a T2B – pro napájení budících měničů synchronních generátorů

- primární napětí 6kV
- sekundární napětí dle parametrů synchronního generátoru
- výkon 800kVA
- pracovní frekvence 85-65 Hz
- typ suché

○ Transformátory T3A a T3B – pro napájení tyristorových měničů toroidálního vinutí

- primární napětí 6kV
- sdružené sekundární napětí 370 V - naprázdno
- výkon 18MVA / 2.5 s
- typ suché

○ **Transformátor T4 – pro napájení tyristorových měničů rovnovážného vinutí - EFPS**

- primární napětí 6 kV
- sdružené sekundární napětí 210 V - naprázdno
- výkon 6MVA / 1.5 s
- typ suché

○ **Transformátor T5 – pro napájení tyristorových měničů tvarovacího vinutí - SFPS**

- primární napětí 6kV
- sdružené sekundární napětí 410 V - naprázdno
- výkon 8MVA / 1.5 s
- typ suché

○ **Transformátory T6 a T7 – pro napájení tyristorových měničů magnetizačního vinutí - OH/MFPS**

trojvinutový transformátor (T6) pro napájení dvanácti-pulsního měniče (DC 650V) splňující následující parametry:

- primární napětí 6kV
- sdružené sek. napětí 530 V – naprázdno
- výkon 10MVA / 1.5 s
- typ suché

trojvinutový transformátor (T7) pro napájení dvanácti-pulsního měniče DC 850V splňující následující parametry:

- primární napětí 6kV
- sdružené sek. napětí 700 V – naprázdno
- výkon 16MVA / 0.15 s
- typ suché

○ **Transformátor T8 – napájení zdrojů pro zesilovače FFPS**

- primární napětí 6kV
- sekundární napětí 3 x 400V
- výkon 2MVA / 1.5 s
- spojení D/Y

- Transformátory T9, T10 - pro napájení systému pro vstřik neutrálních atomů (NBI) a klystronů pro mikrovlnný ohřev

▪ primární napětí	6kV
▪ sekundární napětí	3 x 400V
▪ výkon	1.5 MVA / 0.5 s
▪ spojení	D/Y

4.3 Specifikace měničů

- Uložení v skříních krytí IP 20, včetně systému řízení, chlazení a ochran tyristorů před přepětím i nadproudem a zkratem.
- Řídící a ochranná příslušenství musí být vybavena místní diagnostikou a možností dálkového monitorování a řízení.
- Ochranný prvek zajišťující ochranu před přepětím ze strany napájeného vinutí (crowbar), bude instalován přímo na svorkách napájeného vinutí, s vlastní systémem spouštění bez použití závislého zdroje pomocného řídicího napětí.
- Funkce všech usměrňovacích zdrojů je časově svázaná a složená ze tří časových fází:
 - Fáze #1 - nabuzení toroidního a magnetizačního obvodu, s následným řízeným poklesem proudu v magnetizačním vinutí. V této fázi se rovněž připínají ostatní poloidální cívky a probíhá nárůst proudů.
 - Fáze #2 - proud toroidního obvodu zůstává konstantní, proud magnetizačního vinutí je řízen s danou strmostí nárůstu. Proudů rovnovážného a tvarovacího vinutí dosahují přibližně ustálených hodnot.
 - Fáze #3 - řídicí obvody všech měničů zajistí řízené odbuzení všech vinutí, s eventuální rekuperací naakumulované energie zpět do sítě 6kV/85-65Hz.
- Ve specifikaci proudů jsou uváděny dvě hodnoty oddělené lomítkem, které platí pro režimy provozu tokamaku se sníženým toroidálním magnetickým polem $TF = 1.2$ T, respektive s maximálním polem $TF = 2.1$ T.
- Pokud není uvedeno jinak, pak se délka proudového impulsu uvedené hodnoty uvažuje 1 s pro snížené TF a 0.5 s pro maximální TF.

4.3.1 Měnič pro toroidální vinutí

Skládá se ze čtyř dvoukvadrantových měničů napájených ze dvou trojvinutových transformátorů. Dvojice měničů jsou spojeny paralelně přes oddělovací indukčnosti - výsledný průběh napětí 12-ti pulsní usměrnění.

<i>VSTUP</i>	dva třífázové systémy posunuté o 30°	
	sdrúžené napětí	370 V
	maximální proud (rms)	42kA / 75kA
<i>VÝSTUP</i>	výstupní napětí	450V // invertorový režim -300V
	maximální proud	52kA / 92kA

4.3.2 Měnič pro vinutí EFPS: (rovnovážné vinutí)

Skládá se ze dvou dvoukvadrantových měničů napájených z trojvinutového transformátoru a spojených přes oddělovací indukčnosti paralelně, výsledný průběh napětí 12-ti pulsní usměrnění.

<i>VSTUP</i>	dva třífázové systémy posunuté o 30°	
	sdrúžené napětí	210 V
	maximální proud (rms)	6.5kA / 14.7 kA
<i>VÝSTUP</i>	výstupní napětí	270 V // invertorový režim 180 V
	maximální proud	7 kA / 16 kA

4.3.3 Měnič pro vinutí SFPS: (tvarovací vinutí)

Skládá se ze dvou čtyřkvadrantových měničů napájených z trojvinutového transformátoru a spojených přes oddělovací indukčnosti paralelně, výsledný průběh napětí 12-ti pulsní usměrnění.

<i>VSTUP</i>	dva třífázové systémy posunuté o 30°	
	sdrúžené napětí	410 V
	maximální proud (rms)	4 kA / 9.8 kA
<i>VÝSTUP</i>	výstupní napětí	540 V // invertorový režim 360 V
	maximální proud 1s	5 kA / 12 kA

4.3.4 Měníč pro vinutí OH / MFPS: (magnetizační vinutí)

Zdroj pro inicializaci výboje je napájen z transformátoru T 7 (viz obr. č.10) a bude těchto parametrů:

<i>VSTUP</i>	dva třífázové systémy posunuté o 30° - sdrúžené napětí 700 V	
	maximální proud (rms)	14.7 kA
<i>VÝSTUP</i>	výstupní napětí	850 V // invertorový režim 570V
	maximální proud	18 kA, doba pulsu 0,15 sec.

Odpor včetně spínacího prvku pro vřazení odporu do obvodu magnetizačního vinutí, mohou být instalovány mimo skříně měniče a budou tvořit součást dodávky.

Zdroj pro magnetizaci během fáze udržení výboje skládá se z dvou dvoukvadrantových měničů napájených z trojvinutového transformátoru a spojených přes oddělovací indukčnosti paralelně, výsledný průběh napětí 12-ti pulsní usměrnění.

<i>VSTUP</i>	dva třífázové systémy posunuté o 30° - sdrúžené napětí 530 V	
	maximální proud (rms)	9.8 kA
<i>VÝSTUP</i>	výstupní napětí	650 V // invertorový režim 440 V
	maximální proud	0-12 kA pila 1 sec.

4.4 Akumulační zdroj energie Tab. 4-1

Tab. 4-1 synchronní generátor se setrvačnickem (jeden kus) [8]:

výkon generátoru	47 MVA (35 MW)
doba výkonového pulsu	~ 2.5 sec.
napětí generátoru	6 kV + poznámka*
kolísání napětí během pulsu	2%
frekvence generátoru	min. 85 – 65 Hz
využitelná energie pulsu	40 MJ
doba náběhu na jmenovité otáčky	~ 40 min.
doba opětného dosažení plných otáček pracovním pulsu	~ 10 min.
jmenovité (horní) otáčky	~ 1700 – 2500 1/min.
zkratový výkon	~ 235 MVA
hladina vnějšího hluku (s krytem)	≤ 70 dB

*) Pro zajištění optimálního řízení tyristorových měničů v různých výkonových režimech tokamaku požadujeme možnost regulace výstupního napětí generátoru v rozmezí od 50% do 100% jmenovitého napětí.

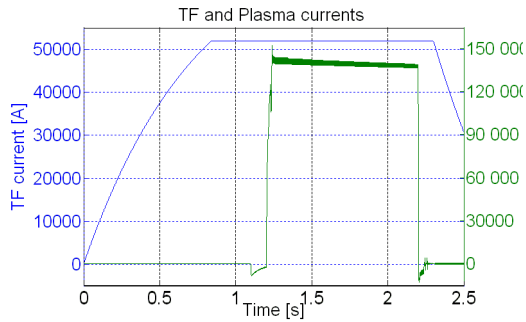
Odolnost proti zkratu (hlavní vypínače generátorů) – v případě zkratu se předpokládá odpojení generátorů do 100 ms.

Zátěž generátorů při režimech sníženého TF a maximálního TF

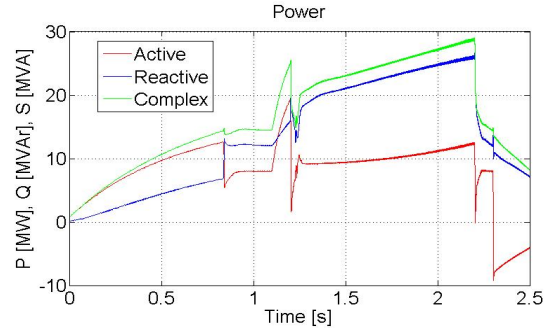
Podrobnější informace o simulovaných průbězích zatížení generátorů jsou ukázány v grafech v Obr 4-1 až Obr 4-6. V režimu sníženého toroidálního pole (TF ~ 1.2 T) budou všechny impulsní zdroje napájeny z jednoho generátoru. Jeho zátěž bude dána zvolenými hodnotami toroidálního pole, proudu plazmatu a délky výboje. Na Obr. 4-1 je předpokládaný typický průběh toroidálního proudu (52 kA) a proudu plazmatu (140 kA) při délce výboje 1 s. Na obr. 21 je zátěž generátoru při takovém typickém výboji. Poloidální proudy přitom mají hodnoty přibližně EFPS ~ 5 kA a SFPS ~ 8 kA.

V režimu s TF > 1.2 T bude jeden generátor napájet toroidální cívky a druhý generátor všechna ostatní vinutí tokamaku i další spotřebiče impulsního výkonu. Na Obr. 4-3 jsou průběhy proudu a napětí toroidální cívky pro maximálním toroidální pole (2.1 T / 92 kA) a délku výboje 0.5 s. Na Obr. 4-4 jsou pak zátěžové průběhy pro první generátor který napájí TF. Toto je maximální předpokládané zatížení na které musí být oba generátory dimenzovány.

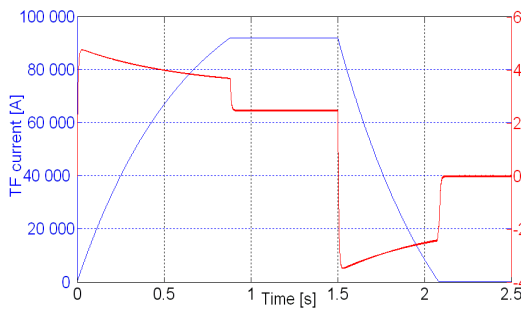
Na Obr. 4-5 jsou průběhy poloidálních proudů při maximálním předpokládaném zatížení poloidálních cívek. Na Obr. 4-6 jsou pak zátěžové průběhy pro druhý generátor.



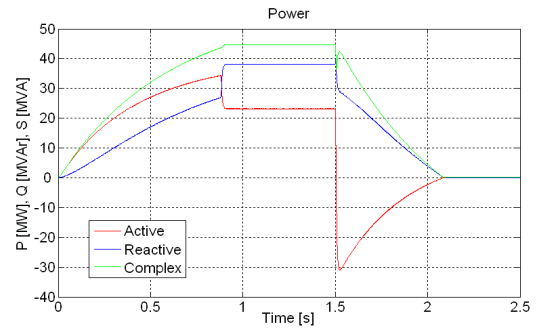
Obr. 4-1 proudy TF a plazmatu [8]



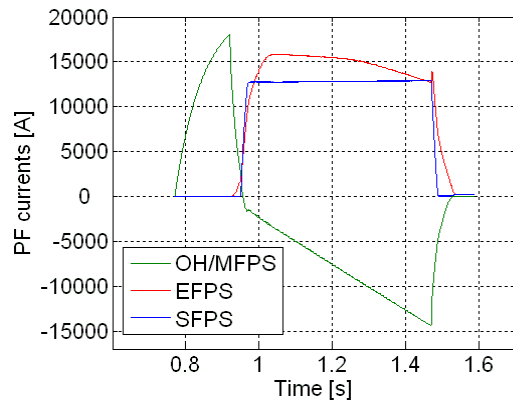
Obr. 4-2 zátěž generátoru pro $TF = 1.2 T$ [8]



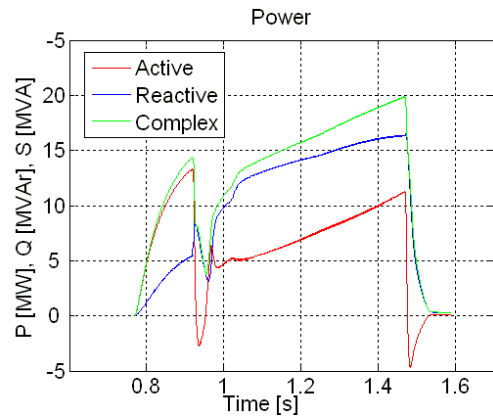
Obr. 4-3 proud a napětí TF pro $TF = 2.1 T$ [8].



Obr. 4-4 zátěž generátoru 1 - $TF = 2.1 T$ [8]



Obr. 4-5 proudy PF pro plný výkon [8]



Obr. 4-6 zátěž generátoru 2 - PF pro plný výkon [8]

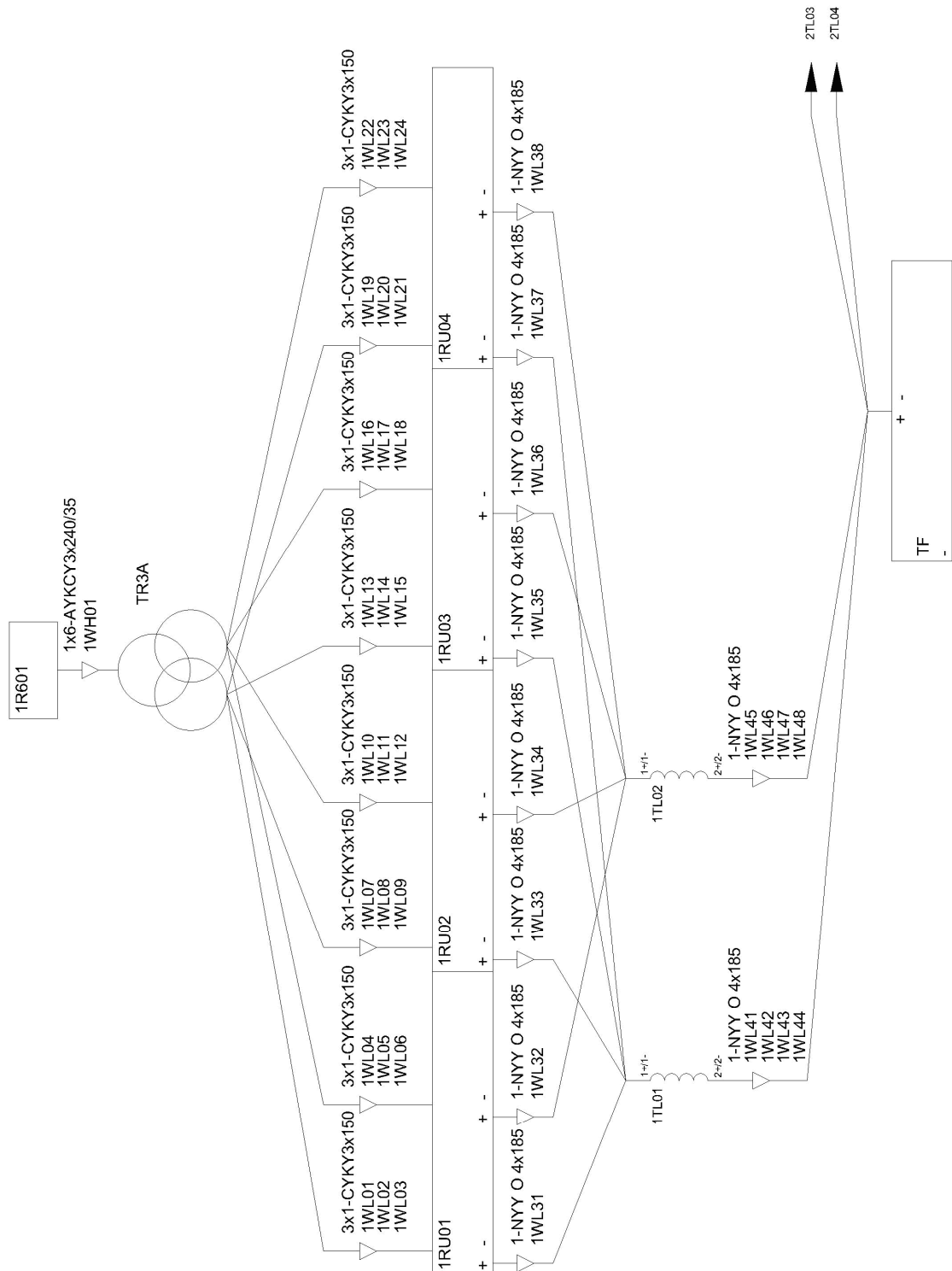
5 NÁVRH NAPÁJECÍ SÍTĚ A DIMENZOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ

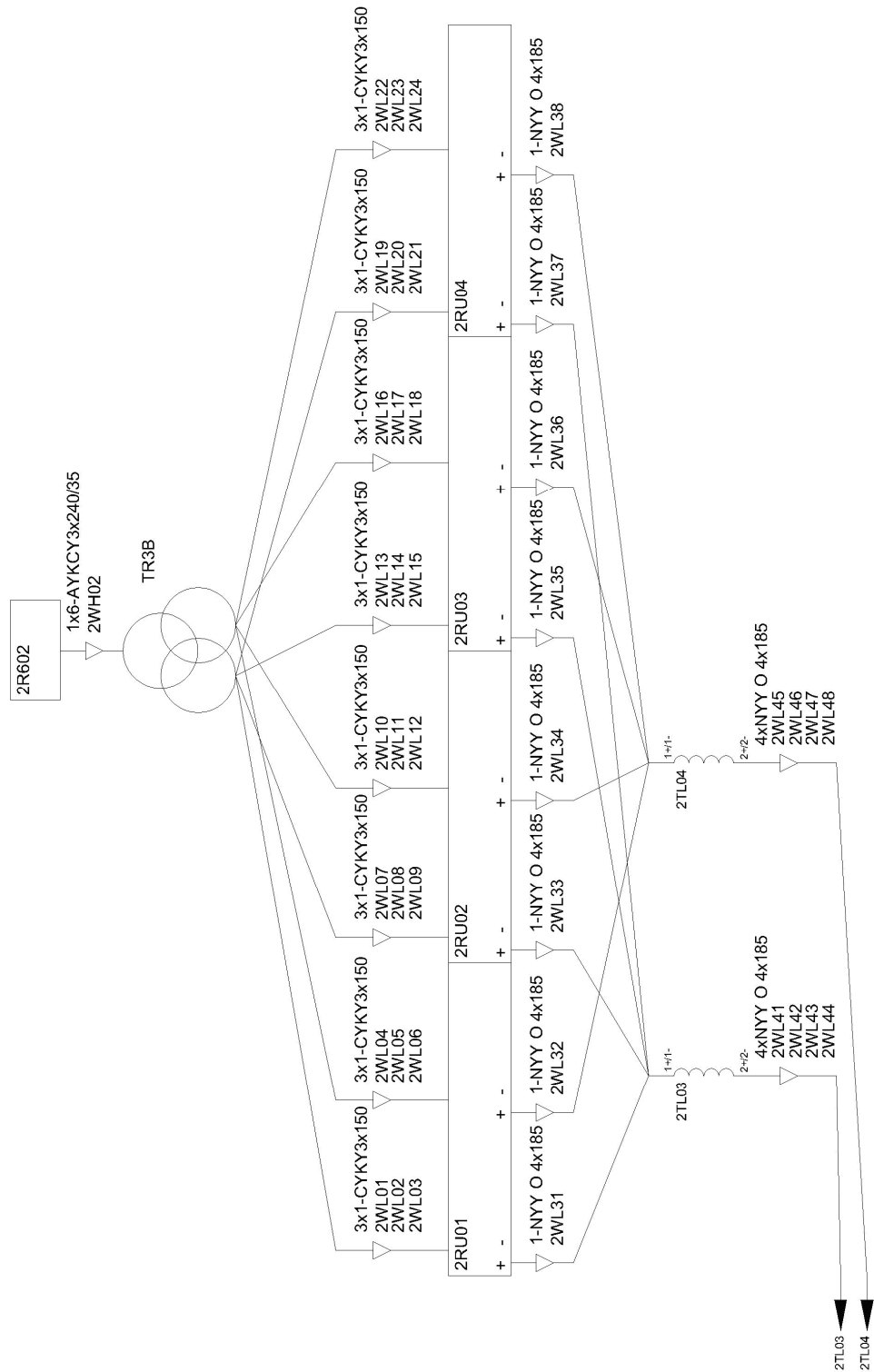
Soupis všech použitých prvků pro napájení cívek Tokamaku COMPASS D k rozvaděči 6kV. Každá cívka má své napájení a má svůj blok.

5.1 Rozdělení napájecí sítě do jednotlivých bloků podle napájených cívek v Tokamaku

5.1.1 Blok napájení soustav toroidálního vinutí Tokamaku COMPASS D (TF)

Obr. 5-1 a Obr 5-2



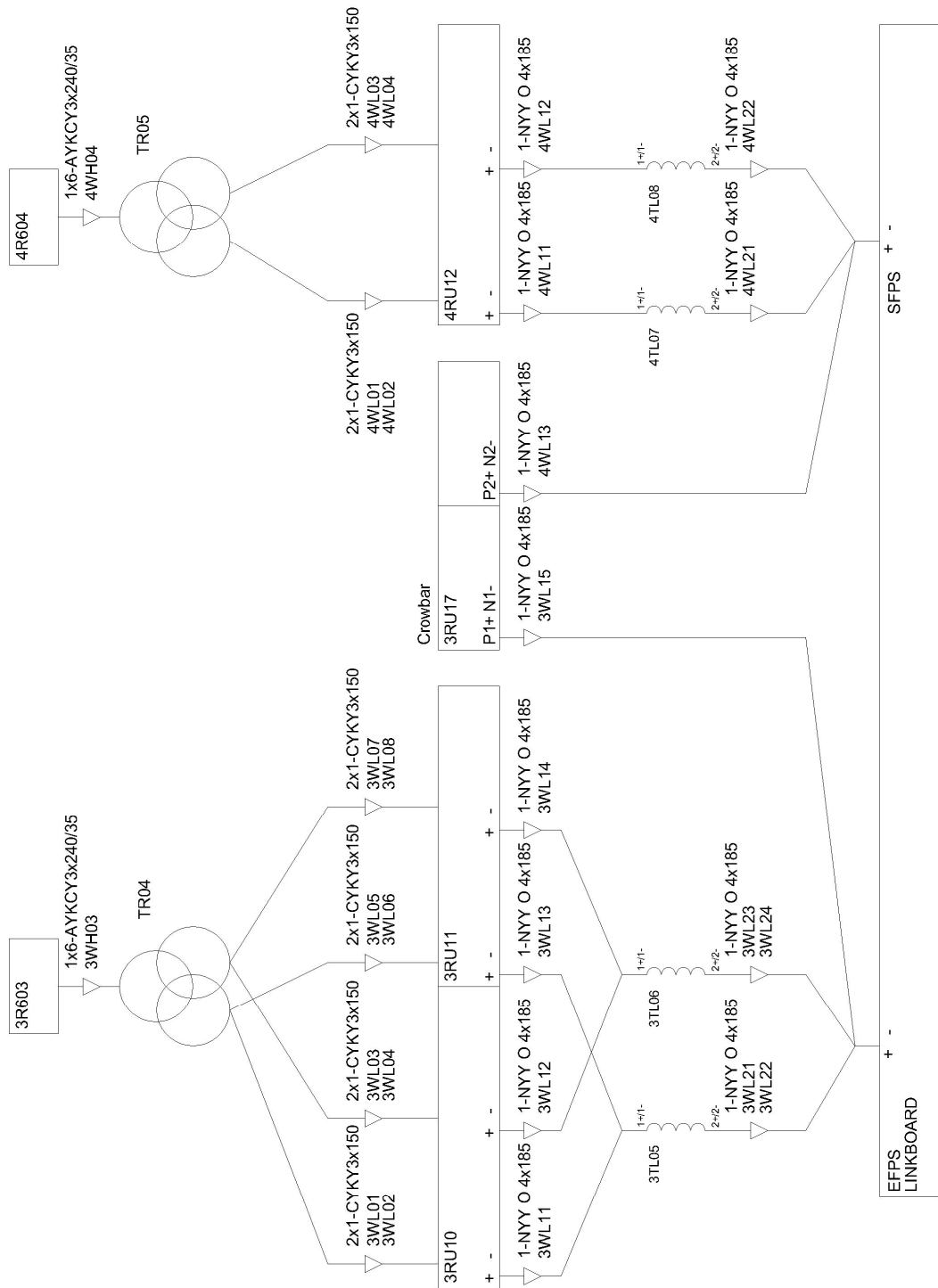


Obr. 5-1 a Obr. 5-2 napájení cívek toroidálního vnutí (TF) Počátek je v rozvaděči

Toroidální vinutí je napájeno přes pomocné tlumivky 1TL01-04, kabelem měniči 1RU01-08. Tato cesta je propojena kabely NYY O 4x185 *Obr. 5-5*. Měníče jsou napájeny z transformátorů TR3A a TR3B kabelem 3x1-CYKY 3x150 *Obr. 5-6*. Transformátory mají sekundární vinutí připojeno na bloky rozvaděče 1R601 a 1R602 kabelem 1x6-AYKCY 3x240/35 *Obr. 5-7*.

5.1.2 Blok napájení poloidálního vinutí EFPS a SFPS Tokamaku COMPASS

D Obr. 5-3

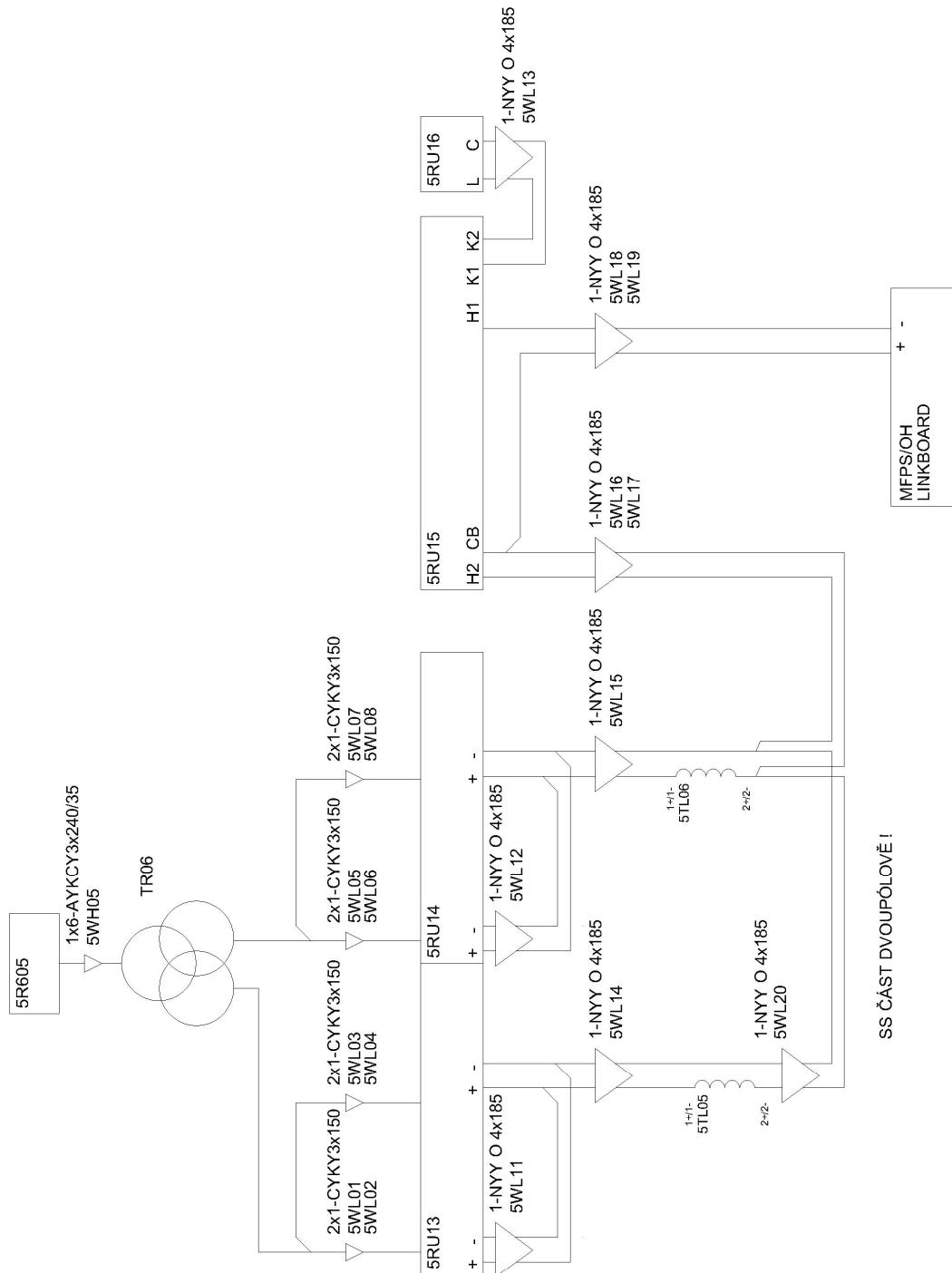


Obr. 5-3 schematické zapojení pro napájení cívek EFPS a SFPS poloidálního vinutí

Ze schémat je patrné, že napájení cívek EFPS a SFPS je obdobné jako u napájení cívek pro TF vinutí. Pro EFPS vinutí je použit blok rozvaděče 3R603, transformátor TR04 a měniče 3RU10 a 3RU11 a tlumivky 3TL05 a 3TL06. Pro SFPS vinutí je to blok 4R604, transformátor TR05, měnič 4RU12 a tlumivky 4TL07 a 4TL08. Kabelové provedení je totožné jako u provedení napájení toroidálního vinutí, pouze se změnou počtu žil v kabelu, který vede z tlumivek TL do vinutí na Tokamaku. Prvek ve schématu CROWBAR je přepět'ová ochrana, která je uložena v rozvaděči 3RU17. Jedná se o to, když zanikne plasma dojde k přepětí a aby toto přepětí nebylo nebezpečné, omezuje se touto ochranou.

5.1.3 Blok napájení poloidálního vinutí MFPS/OH Tokamaku COMPASS D

Obr. 5-4



Obr. 5-4 napájení cívky MFPS/OH

5.2 Specifikace použitých prvků

5.2.1 Transformátory

Společné požadavky na transformátory

Suché distribuční transformátory zalité v pryskyřici s certifikací podle ISO 9001 vyrobené podle ČSN EN 60076-1+A11 pro vnitřní a ve skříní i venkovní instalaci, max. teplota okolí a chladicího prostředí ne vyšší než +40°C, max. instalační výška nad hladinou moře 1000 m, trvalé zatížení S1.

- bezúdržbové
- vlhkuvzdorné – třída prostředí E1 (E2 na poptávku)
- těžce zápalné a samozhasitelné – třída hořlavosti F0 (F1 na poptávku)
- odolné proti rázovému napětí a zkratu
- odolné proti tepelnému šoku (okamžitý ohřev z – 30°C) – klimatická třída C2
- primární vinutí zalité ve vakuu do kompaktního válce s hladkým, znečištění odolným povrchem
- sekundární vinutí izolované Prepreg-fólií¹ a vytvrzené
- bez částečných výbojů - méně než 5 pC podle SGB (IEC 726 předepisuje 20 pC)

Vybavení a příslušenství

- zvedací oka
- výkonový štítek
- zemnicí šrouby
- kolečka přestavitelná pro podélný a příčný pojezd, z výroby nastaveno pro příčný pojezd
- dvě sondy s PTC termistory na každou fázi s vybavovacím přístrojem (TS-01) pro výstrahu a odpojení
- dvojitý teploměr Pt100 na každou fázi, vyvedeno do svorkové krabice na straně nn
- VN připojení zesponu Al
- NN vývody dolů Cu
- dispozice a rozměry vývodů podle výkresu

¹ Prepreg-fólie je speciální skelná tkanina oboustranně naimpregnovaná dosud nevytvrzenou pryskyřicí. Po vytvrzení vznikne kompaktní cívka, zkoušená v lisu na tlak (zkouška kvality). Vývodní pasy jsou k fólii připevněny svařováním zastudena. Kvůli odvodu tepelných ztrát, a tím nepřímého ovlivnění přetížitelnosti a životnosti transformátoru, jsou v cívkách axiální chladicí kanály.

Tab. 5-1 parametry použitých transformátorů:

Označení trafo		TF-T3A,T3B	EFPS-T4	SFPS-T5
Typ		DTTHDG 4000/6	DTTHDG 1250/6	DTTHDG 1600/6
Výkon	KVA	4000	1250	1600
Puslní výkon		24MVA\2,5s	7MVA\1,5s	9MVA\1,5s
Vyšší napětí	V	6000	6000	6000
Odbočky u vyššího napětí	%	2x±2,5	2x±2,5	2x±2,5
Nižší napětí	V	2x370	2x280	2x540
Skupina zapojení		Dy0,75d11,75 ²	Dy1d0	Dy1d0
Krytí trafo		IP 00	IP 00	IP 00
Chlazení		AN ³	AN	AN
Třída izolace		F	F	F
Napětí nakrátko (při pulsu)	%	20	20	20
Rozměry				
Délka cca.	mm	1700	1450	1500
Šířka cca.	mm	1250	1000	1000
Výška cca.	mm	2800	2200	2250
Hmotnost cca.	kg	7500	3700	4000

V tabulce nejsou uvedeny parametry jako například ztráty nakrátko a naprázdno. Pro tento případ nejsou potřeba, protože zkratové poměry se počítají pouze ze zdánlivého výkonu pulsního, vztaženého na napětí nakrátko. **Činná složka se zanedbává!**

$${}^1 Z_T = {}^1 X_T = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

² Primární vinutí je zapojeno do lomené hvězdy a sekundární je jedno trojúhelník a druhé hvězda (jedná se o trojvinut'ový transformátor

³ Přirozené vzduchové chlazení

5.2.2 Propojovací kabely

5.2.2.1 Dimenzování kabelů:

➤ **Zásady, podle kterých se postupuje při určování průřezů vodičů a volbě jističích prvků**

➤ **Hlavní zásady**

Podle nichž se určuje průřez vodičů vedení a volí prvek pro jejich jištění. Uvádí se zde, jak se podle nich postupuje v praxi.

Postup spočívá v sedmi základních krocích:

1. výpočet proudu uvažovaného v obvodu,
2. volba jističího přístroje k proudu uvažovanému v obvodu,
3. volba nebo výpočet průřezů vodičů (fázových, středních a ochranných) obvodu s ohledem na jištění,
4. výpočet zkratových proudů a ověření, zda:
 - vodiče i přístroje z hlediska zkratových proudů vyhovují a
 - je zajištěna ochrana i před minimálními zkratovými proudy,
5. ověření, zda je zajištěna ochrana před dotykem neživých částí samočinným odpojením,
6. ověření úbytku napětí.

podle možností též

7. ověření selektivity mezi jističími prvky.

Pátý krok přitom závisí na způsobu zapojení sítě (TN, TT nebo IT).

Protože kroky 1 a 2 splývají dohromady a ověření selektivity vyžaduje mnohdy speciální postup (ověření u výrobce jističích prvků apod.), uvádí se dále pouze pět kroků, které ke stanovení řádného dimenzování a jištění obvodů většinou postačí.

Každý bod je ještě rozvrstven dále a má určité podmínky. Jestliže se během řešení přijde na to, že některá podmínka není splněna, např. délka vedení je příliš velká (a nevyhovuje z hlediska funkce ochrany před zkratem nebo ochrany samočinným odpojením před

dotykem neživých částí nebo z hlediska úbytků napětí), je třeba zvolit větší průřez vodičů a celý výpočet pro něj provést znovu.

Postupy uvedené v této části se uplatňují pro elektrické instalace o napětí do 1 000 V, jejichž vedení jsou provedena izolovanými vodiči nebo kabely.

Hodnoty uvedené v tabulkách této části platí pro instalace na napětí 230 V u jednorázových obvodů a 230/400 V u třífázových obvodů. Pro jiná napětí je nutno použít opravné součinitele. Týká se to tabulek pro maximální délky vedení, která jsou ještě chráněna před zkratem nebo před dotykem neživých částí, nebo pro délky odpovídající poměrnému úbytku napětí.

Tyto hodnoty jsou rovněž platné pro střídavý proud kmitočtu 50 nebo 60 Hz. Pro vyšší kmitočty se uplatní opravné součinitele, zejména pro hodnoty dovolených proudů.

➤ Metody výpočtu zkratových a poruchových proudů

V této části jsou uvedeny pouze zjednodušené metody, kterými se určují charakteristiky obvodů instalací a podmínky pro jejich ochranu. Volba metody závisí na:

- proudech, jejichž znalost je potřebná (zkratové proudy maximální a minimální, poruchové proudy),
- stupni přesnosti výpočtu,
- tom, zda jsou známy charakteristiky napájení a další parametry,
- důležitosti instalace,
- technických prostředků a zařízení, které má projektant, elektrotechnik nebo revizní technik k dispozici.

➤ Volba ochranných přístrojů

V této části se stanoví podmínky pro použití různých ochranných přístrojů, které je možno v elektrických instalacích použít. Vlastnosti těchto přístrojů jsou normalizovány (viz literatura). Pokud se týká pojistek, jejich charakteristiky jsou obvykle typu gG (ČSN EN 60269), které mohou zajišťovat zároveň ochranu před nadproudy i před zkraty.

Pokud se týká jističů, přicházejí v úvahu dva typy:

- malé jističe, jejichž jmenovitý proud je nejvýše roven 125 A a charakteristiky jsou uvedeny níže a jejichž proud, na nějž reagují okamžitě I_m je v níže uvedených mezích; přitom pouze horní mez se bere jako podklad pro zpracování dále uvedených tabulek

(35 až 39, 46 až 52 a 56):

-typ L: $2,7 I_n < I_m \leq 3,85 I_n$

-typ U: $3,9 I_n < I_m \leq 8,80 I_n$

Typy jističů, které odpovídají ČSN EN 60898:

-typ B: $3 I_n < I_m \leq 5 I_n$,

-typ C: $5 I_n < I_m \leq 10 I_n$,

-typ D: $10 I_n < I_m \leq 20 I_n$

Jističe pro všeobecné použití odpovídají ČSN EN 60947-2

- Určení maximálního proudu uvažovaného ve vedení

Maximální výpočtový proud I_B uvažovaný ve vedení se určí následujícím výpočtem:

- Známe-li jmenovité proudy napájených spotřebičů, vynásobíme jejich součet I_n součinem čtyř dále uvedených součinitelů a , b , c a d :

$$I_B = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot I_n$$

- Známe-li jmenovité výkony napájených spotřebičů, vynásobíme součet těchto výkonů P_n součinem uvedených čtyř součinitelů a , b , c a d a ještě součinitelem e :

$$I_B = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot P_n$$

$$I = e \cdot P_n$$

Součinitele pro určení maximálního proudu

a - součinitel, který obdržíme z účinníku $\cos \varphi$ a účinnosti η Součinitel a se vypočítá:

$$a = \frac{1}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

Součinitel a se pohybuje na základě velikosti výkonu motoru. Např. Pro motor pro $P = 600W$ a méně je $a = 2$ a pro $P = 50kW$ a více je $a = 1,2$.

b - součinitel využití

V průmyslových instalacích se součinitel využití pohybuje od 0,3 do 0,9.

Není-li k dispozici přesný údaj, je možno součinitel využití brát pro spotřebiče a motory jako rovný 0,75. Pro tepelné spotřebiče a osvětlení se uvažuje součinitel využití rovný 1.

c - součinitel soudobosti

Určení součinitele soudobosti c vyžaduje podrobnou znalost instalace a při jeho určení je třeba na základě zkušenosti zvážit podmínky využití, zejména pokud se týká motorů a zásuvkových obvodů. Pro každý druh instalace není prakticky možné hodnoty součinitele c určit. Nejsou-li hodnoty součinitele c k dispozici, je možno je volit podle obecných hodnot. Součinitel c se pohybuje v rozmezí 0,75 až 1.

d - součinitel předpokládající další rozšíření instalace nebo rozvodu

Hodnota součinitele d by se měla uvažovat podle předpokládaných podmínek rozvoje instalace. Tento součinitel je roven přinejmenším 1. Pro průmyslové instalace se doporučuje počítat s hodnotou alespoň 1,2.

e - součinitel přepočtu výkonu na proud

Součinitel přepočtu výkonu vyjádřeného v kW nebo v kVA na proud vyjádřený v A je:

4,35 pro jednorázové obvody a jednorázová zařízení na 230 V,

1,44 pro třífázové obvody a třífázová zařízení na 400 V,

8,33 (7,87) pro jednorázové obvody a jednorázová zařízení na 120 V (127 V),

2,51 (2,62) pro třífázové obvody a třífázová zařízení na 230 V (220 V),

1,16 pro třífázové obvody a třífázová zařízení na 500 V,

2,00 pro jednorázové obvody a jednofázová zařízení na 500 V,

2,50 pro jednorázové obvody a jednofázová zařízení na 400 V,

0,84 pro třífázové obvody a třífázová zařízení na 690 V.

➤ Vzorce pro výpočet zkratových a poruchových proudů

V praxi se různé zkratové proudy mohou vypočítat pomocí následujících vzorců:

Maximální proud

I_{k3} - třífázový symetrický zkratový proud [kA]:

$$I_{k3} = \frac{U_0}{Z_1} = \frac{U_0}{\sqrt{\left(R_T + \rho \frac{L}{S_f \cdot N_f}\right)^2 \cdot \left(X_T + \lambda \frac{L}{N_f}\right)^2}}$$

kde:

Z_1 je impedance (resistance spolu s reaktancí) fáze (fázového vodiče spolu s impedancí zdroje) od začátku sítě až k místu zkratu [mΩ],

R_T, X_T jsou složky impedance (tj. rezistance R_T a reaktance X_T) jedné fáze od začátku sítě až k začátku uvažovaného obvodu spolu s impedancí zdroje (obvykle transformátoru) [mΩ],

L je jednoduchá délka vedení [m],

S_f je průřez fázových vodičů uvažovaného obvodu [mm²],

N_f je počet paralelních fázových vodičů,

- ρ je rezistivita vodičů (může se počítat, že vlivem zvýšené teploty je v některých případech vyšší než rezistivita při 20 °C) [$\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$],
- λ je reaktance na jednotku délky vodičů [$\text{m}\Omega/\text{m}$],
- U_0 je fázové napětí naprázdno [V].

I_{k2} - dvoufázový zkratový proud [kA]

$$I_{k2} = \frac{U_0 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot Z_1} = 0,86 \cdot I_{k3}$$

I_{k1} - jednofázový zkratový proud [kA]

$$I_{k1} = \frac{U_0}{Z} = \frac{U_0}{\sqrt{\left(R_T + R_n + \rho \cdot L \left(\frac{1}{S_f \cdot N_f} + \frac{L}{S_n \cdot N_n} \right) \right)^2 \cdot \left(X_T + X_n + \lambda \cdot L \left(\frac{1}{N_f} \cdot \frac{L}{N_n} \right) \right)^2}}$$

kde

R_n, X_n jsou složky impedance (tj. rezistance R_n a reaktance X_n) středního vodiče spolu s odpovídající impedancí zdroje (obvykle transformátoru) od začátku sítě až k začátku uvažovaného obvodu [$\text{m}\Omega$],

S_n je průřez středního vodiče uvažovaného obvodu [mm^2],

N_n je počet paralelních středních vodičů.

Z hlediska zkratu lze určit průřez:

$$S = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K}$$

I_{ke} – ekvivalentní zkratový proud (A); proud, který za dobu zkratu vyvine stejně tepla jako zkratový proud

t_k – doba trvání zkratu; podle vypínacího prvku

K – materiálová konstanta

$$I_{ke} = I_{ks} \cdot I_e$$

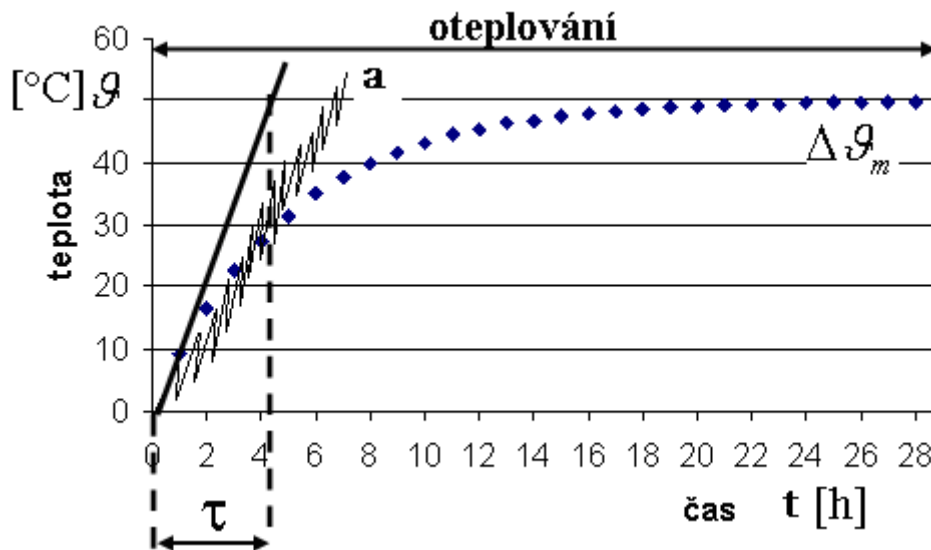
I_{ks} – rázový zkratový proud (A) za dobu 0 – 3 T_k (T_k – časová konstanta rázové složky)

k_e – koeficient

- Postup dimenzace pro tokamak COMPASS D z pohledu provozního oteplování

Zde dochází k hodně zjednodušení. Nejdůležitější pro dimenzaci vodičů vn je dimenzace na zkratu a dimenzace na zvýšení teploty při pulsu. K ostatním dimenzacím se spíše jen přihlíží, například z hlediska, že jsou tyto kabely a lana dlouhé pouhých cca 20m. U stejnosměrných vodičů je nejdůležitější dimenzování na oteplení.

Při dimenzování kabelů používáme dané charakteristiky pro každý kabel, kterou určuje výrobce. Jedná se o oteplovací charakteristiku.



U tokamaku se pohybujeme v místě, kdy $t \ll \tau$, podle charakteristiky **a** (jedná se o charakteristiku, která má při oteplení rychlý exponenciální průběh a při oteplení pomalý průběh, taktéž exponenciální. V grafu jde jen o zběžné zakreslení, které je obecného rázu). Která záleží na počáteční teplotě kabelu. Ta se pohybuje v rozmezí 20-25°C. V grafu je vidět, jak se teplota kabelu s každým pulsem otepluje a teplota se sčítá. Oteplení proběhne za dobu pulsu t . Ta se pohybuje v rozmezí 1,5 – 2,5s. Potom dochází k ochlazení po dobu minimálně 15min (15-25min - tj. doba, kdy se roztáčí opětně generátor z 65Hz na 85Hz k dalšímu pulsu) a po této době opět dojde k pulsu a tedy k opětnému oteplení. Ochlazení v době „klidu“, tedy $t = 15\text{min}$ lze spočítat následovně pomocí experimentálního vzorce:

$$\Delta g_{ochl} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Nechť tedy máme $t = 15\text{min}$ a $\tau = 25\text{min}$, tak procentní ochlazení bude:

$$\Delta g_{ochl} = e^{-\frac{900}{1500}} = 0,55 \Rightarrow 55\%$$

Zde tedy vidíme, že dojde k ochlazení pouze o 55%. Tedy, při každém pulsu se bude zvětšovat teplota kabelu. Abychom věděli pro jakou teplotu kabel dimenzovat, je důležité znát dobu provozu, která činí pracovní dobu 8hodin.

Pokud tedy pracovní doba bude 8hodin, můžeme si vypočítat přibližné množství pulsů, které za tuto dobu budou

$$n_p = \frac{(8 \cdot 60)}{15} = 32$$

Tedy 32x dojde k oteplení kabelu.

Pokud bereme oteplení 100% při pulsu $t = 2,5\text{s}$, vypočítáme, že při každém pulsu se nám kabel oteplí o 45%.

Nyní musíme vypočítat o kolik se za daný puls kabel oteplí. Použijeme vzorec:

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{otepl.vodiče}} = \left(\frac{I}{I_n} \right)^{2,49} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Ale jelikož se pohybujeme v $t \ll \tau$, použijeme vzorec

$$\Delta \mathcal{G} = \frac{R \cdot I^2 \cdot t}{m \cdot c}$$

$\Delta \mathcal{U}$ -oteplení vodiče

m -hmotnost vodiče

c -měrná tepelná kapacita

R -odpor vodiče

I -proud vodičem

t -doba působení proudu (pro toroidální vinutí 2,5 s, pro ostatní části 1,5 s)

Po dosazení dostaneme max. 3 °C

Dalším krokem se podíváme o kolik se oteplí daný kabel za 8hodin.

$$\Delta \mathcal{G}_{8\text{hod}} = 32 \cdot 3 \cdot 0,45 = 43,2^\circ\text{C}$$

Pokud připočítáme počáteční oteplení, které se bude pohybovat v maximálních teplotách $\vartheta = 25^\circ\text{C}$

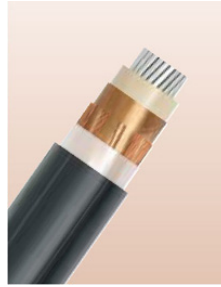
$$\mathcal{G}_{\text{dimenz}} = 32 \cdot 3 \cdot 0,45 + 25 = 68,2^\circ\text{C}$$

Proto budeme potřebovat kabely, které mají nejvyšší dovolenou provozní teplotu 70 °C. A na tuto teplotu jsou tyto kabely navrženy. Další teplota, pro kterou se kabel dimenzuje je maximální teplota, kterou dosáhne kabel při zkratu. Tedy do doby jeho vypnutí. Tato teplota se pohybuje v okolí 120 °C

Pokud budou kabely uloženy na místě, kde bude obtížné chlazení, uvažujme oteplení pro každý puls 80% a chlazení 20%. Po dosazení, zjistíme, že možných povolených pulsů je:

$$n = \frac{70 - 25}{0,8 \cdot 3} = 18,75 \Rightarrow \text{Tomu odpovídá 25min na jeden puls.}$$

5.2.2.2 1x6-AYKCY 3x240/35 Obr. 5-5



Obr. 5-5 Ukázka kabelu 1x6-AYKCY 3x240/35 [3]

Jádro je tvořeno stočenými hliníkovými dráty o minimálním počtu a největším odporu viz tabulka Tab. 5-2

Tab. 5-2 výňatek z tabulky pro složení jádra kabelu 1x6-AYKCY 3x240 [3]

Průřez jádra (mm ²)	Nejmenší počet drátů v jádře Al	Největší odpor jader při 20 °C Al (Ω/km)
240	30	0,125

Tab. 5-3 výběr parametrů kabelu pro stínění 25 pro uložení ve vzduchu [3]

Jmenovitý průřez jádra, stínění a počet žil (mm ²)	Provedení jádra (Al)	Informativní průměr kabelu (mm)	6-AYKCY (kg/m)	Informativní hmotnost kabelu (kg/m)	I ₀ Al jádra ve vzduchu (A)	zatížitelnost I ₀ Al jádra ve vzduchu (kA)	Zkratový proud po dobu trvání 1s (kA)	Casová oteplovací konstanta (s)	Kapacita (μF/km)	Induktivnost (mH/km)
3 x 240/25	SM	64,0	5,35		323	18,20	1410	0,863	0,281	

Izolace je z PVC. Hodnota izolačního odporu materiálu musí být minimálně 1.10¹¹ Ω.cm. Barva izolace je přírodní u všech žil.

Žíly třížilových kabelů jsou stočeny případně se středovou a opatřeny lisovanou pryžovou výplní. Na lisované pryžové výplni je vnitřní plášť z PVC. Výplň může být nahrazena vhodnými vložkami.

Jmenovitý průřez stínění je 35 mm². Pod stíněním je polovodivá páska. Stínění je tvořeno měděnými dráty a protispirálou z Cu pásky. Průměr drátu nesmí být menší než 0,5 mm. Na základě požadavku zákazníka je možná kombinace průřezu stínění odlišná. Stínění je ovinuto separační páskou. Odpor stínění je pro průřez: 35 mm² 0,524 Ω/km.

Jmenovité napětí: U_o/U 3,6/6 kV

Zkušební napětí: 15 kV

Dovolené teploty: provozní teplota $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejvyšší dovolená teplota jádra po dobu než jištění vypne zkrat je $+160\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro průřezy do 300 mm^2 a $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro průřezy nad 300 mm^2 . Nejmenší dovolená teplota pro pokládku kabelů je $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, při zvýšené opatrnosti $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota pro manipulaci s bubny a kruhy je v rozsahu -25 až $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Minimální teplota prostředí při skladování kabelů je $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Poloměr ohybu: nejmenší dovolený poloměr ohybu musí být $15x d$, kde „d“ je informativní průměr kabelu.

5.2.2.3 1-CYKY 3x150 Obr. 5-6



Obr. 5-6 kabel 1-CYKY 4x150+70 bez PEN vodiče je to vodič 3x150 [3]

Jádro je tvořeno stočenými hliníkovými dráty o minimálním počtu a největším odporu viz tabulka Tab. 5-4

Tab. 5-4 výňatek z tabulky pro složení jádra kabelu 1-CYKY 3x150 [3]

Průřez jádra (mm^2)	Nejmenší počet drátů v jádře Cu	Největší odpor jader při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Cu (Ω/km)
150	18	0,12531

Tab. 5-5 výběr parametrů kabelu 1-CYKY 3x150 pro uložení ve vzduchu [3]

Průřez jádra (mm^2)	Nejmenší izolační odpor při $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\text{M}\Omega/\text{km}$)	Provedení jádra (Al)	Informativní vnější průměr kabelu 1-CYKY (mm)	Informativní hmotnost kabelu 1-CYKY (kg/km)	U _I ve vzduchu tři žíly zatíženy I _{nv} (A)	Induktivní reakce (ωL) 2 a 3 žíly (Ω/km)
150	0,0028	SM	42,0	5000/4800	319	0,073

Izolace je z PVC. Výplňový obal může být lisovaný nebo vintý z vhodného materiálu kolem stočených žil. Plášť kabelu typu 1-CYKY z PVC.

Jmenovité napětí: U_0/U 0,6/1 kV

Zkušební napětí: 4 kV

Dovolené teploty: provozní teplota -25 °C až $+70\text{ °C}$. Nejvyšší dovolená teplota jádra po dobu než jištění vypne zkrat je $+160\text{ °C}$. Nejmenší dovolená teplota pro pokládku kabelů s PV C pláštěm je $+4\text{ °C}$, při zvýšené opatrnosti -5 °C . Nejmenší dovolená teplota pro pokládku kabelů s PE pláštěm -5 °C . Teplota pro manipulaci s bubny a kruhy je v rozsahu -25 až $+40\text{ °C}$. Minimální teplota prostředí při skladování kabelů je -35 °C .

Poloměr ohybu: nejmenší dovolený poloměr ohybu musí být pro informativní průměr kabelu: přes 40 mm 15 d Kde d je informativní průměr kabelu.

Pokyny pro používání: kabely s PVC pláštěm jsou určeny pro pevné uložení do země nebo na vzduchu. Kabely typu 1-CYKY jsou určeny pro pevné uložení v prostředí bez jakéhokoliv druhu mechanického namáhání. Dle ČSN 33 2312 článek 2.10, je možno silové vodiče a kabely klást přímo do hořlavých materiálů (např. do dřeva) se stupněm hořlavosti B, C1, C2, C3 nebo na ně za předpokladu, že jsou alespoň odolné proti šíření plamene. Kabely s PVC pláštěm podle této PN tuto podmínku splňují.

5.2.2.4 NYY O 4x185 Obr. 5-7



Obr. 5-7 kabel NYY O 4x185 [3]

Konstrukce

- Měděné plné nebo laněné jádro
- Izolace jádra z termoplastického PVC
- Žíly spolu stočeny
- Plášť z termoplastického PVC, barva pláště černá
- Samozhášecí a odolné šíření plamene PVC dle DIN VDE 0482 část 265-2-1/ EN 50265-2-1/ IEC 60332-1

Technická data

- Provozní teplota při pokládce od -5 °C do $+50\text{ °C}$, pevné uložení od -30 °C do $+70\text{ °C}$
- Jmenovité napětí U_0/U 0,6/1 kV

- Střídavé zkušební napětí 4000 V
- Minimální poloměr ohybu jednožilový. 15x průměr kabelu, vícežilový 12x průměr

Použití

Silové kabely pro dodávku energie mohou být instalovány venku, pod zemí, ve vodě, v kabelovodech, v elektrárnách, pro průmyslové a distribuční panely a pro účastnické sítě, kde nebudou mechanicky poškozeny.

Tab. 5-6 výběr parametrů kabelu I-CYKY 3x150 pro uložení ve vzduchu [3]

Počet žil a jmenovitý průřez (mm ²)	Maximální vnější průměr (mm)	Provedení jádra (Al)	Proud. zatěž. ve vzduchu - inf. hodnota (A)	Hmotnost - informativní hodnota (kg/km)	Maximální odpor jádra při 20 °C (Ω/km)
4 x 185	58	SM	374	8500	0,0991

5.2.3 Měníče

Měníče jsou použity univerzální, které nebyly konstruovány na Tokamak (nemají typové označení). Dimenzují se na napětí pro danou cívku. Jedná se o skříňové usměrňovače, složené ze dvou šestipulsních měničů, z nichž každý je navržen na výstupní proud až 7kA. Tedy výstupní proud skříňového měniče může dosáhnout až 14kA.

5.2.4 Ochrany

Ochrany jsou umístěny v rozvaděči a skládají se z výkonových pojistek, přepěťová ochrana výše uvedená jako crowbar a potom to jsou ochrany transformátorů. Ty jsou řešeny v podobě nadproudové časově nezávislé ve třech stupních. Jeden stupeň chrání proti zkratu na primární straně, další stupeň proti zkratu na sekundární straně a poslední stupeň chrání proti přetížení. Ochrany musí vypnout do 100-150ms. Pokud se zkrat nevypne do 200ms, dojde ke znehodnocení měničů. Dále to jsou generátorové ochrany, které jsou podobné jako u transformátorů, ale jsou doplněny o rozdílovou ochranu, která srovnává proud v uzlu a na výstupu. Mezi transformátorem a měničem ochrana není. Zde zapůsobí nadproudová ochrana, která chrání sekundární stranu transformátoru. Vzdálenost mezi měničem a transformátorem je malá, do 20m.

5.2.5 Generátory

5.2.5.1 Popis akumulčního zdroje a konstrukce generátorů

Provedení stroje

Horizontální

Tvar IM 7311⁴ dle ČSN EN 60034-7 eqv.IEC 60034-7)

Krytí IP 21⁵ dle ČSN EN 60034-5 eqv.IEC 60034-5)

Chlazení AN⁶

Třída izolace: stator F⁷, rotor F

Provedení z hlediska klimatických podmínek

Umístění stroje neklimatizovaný kontejner

Typ atmosféry průmyslová

Teplota okolí max. 40°C

Nadmořská výška max. 1000 m

Relativní vlhkost vzduchu max. 80 %

Přípustné množství nečistot ve vzduchu max. 0,5 mg.m⁻³

Buzení

Statický budicí systém

Provedení rotoru

Výkovek s vyniklými póly ze speciální kované oceli. Vinutí rotoru z elektrolytické mědi. Na hřídeli bude setrvačnick z vysokopevnostní kované oceli.

Provedení ložisek

Kluzná, s nuceným oběhem a hydrostatickým přizvedáváním a kroužky pro doběh

Mazání: olej

celkové množství oleje pro stroj 50 l.min⁻¹, tlak 0,15 Mpa

Olejové hospodářství bude součástí dodávky elektrického stroje. Stanice bude společná pro oba generátory a bude vybavena záložním čerpadlem.

Chlazení

⁴ dvě stojatá ložiska, zvednuté stopy, úložná deska

⁵ krytý proti vniknutí malých předmětů větších než 12mm a krytý proti vniknutí kapající vody

⁶ chlazené vzduchem

⁷ vinutí nízkého napětí buď hliníkové nebo měděné fólie s předimpregnovanou rohoží ze skelných vláken

Cizí s ventilátory na stroji, příkon cca 3 kW,

Sání z prostoru pod protihlukovým krytem, výfuk potrubím mimo kryt

Množství chladicího vzduchu $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Hladina akustického tlaku

$L_{pA} \leq 90 \text{ dB(A)}$ – bez protihlukového krytu

resp. cca 70 dB s protihlukovým krytem

Vývody statoru

Kabelové vývodky s ucpávkou, umístění vývodů po stranách

Počet vývodů: 6 svorek (vyvedeny oba konce fáze)

Měření a kontrola

Teploty:	Počet míst:	Typ čidla:
vinutí	6	Pt 100 ⁸
teplý vzduch	2	Pt 100
studený vzduch	2	Pt 100
ložiska	1 + 1 pro 1 ložisko	Pt 100

Přídavné vyhřívání stroje

Výkon 4 x 500 W, 230 V pro generátor

Svorkovnice čidel a topných těles je na boku stroje vedle skříně vývodů

Upevnění k základu

Základové elementy: podkládací klíny, dosedací desky, kotevní šrouby

Hmotnosti

Stator	15000 kg
Rotor	16000 kg
Setrvačnick	12000 kg
Příslušenství	7000 kg
Celková hmotnost stroje s příslušenstvím	50000 kg

⁸ Platinový odporový teploměr -200 to +850 °C

Akumulační napájecí zdroj je tvořen 2 soustrojími shodného výkonu a provedení, která se skládají:

- ze synchronního generátoru
- setrvačnicku
- poháněcího asynchronního motoru napájeného z frekvenčního měniče

Základní příslušenství napájecího zdroje tvoří:

- budicí soustava
- olejová stanice
- protihlukový kryt

Synchronní generátor

Technické parametry generátoru - 85Hz resp. 65Hz (Tab 5-7 a v Tab. 5-8)

Generátor je navržen pro odběr výkonových impulsů 40MJ při činném výkonu 35MW a při účinníku 0,7 t.j. pro impulsní zdánlivý výkon 50MVA. Při otáčkách 1700min (85Hz) je generátor schopen dodávat zadaný výkon i při napětí 6600V, při chodu na 65Hz je horní hranice napětí 6300V.

Na hřídeli generátoru je umístěn setrvačnick z kované oceli s momentem setrvačnosti 6000kg m². Moment setrvačnosti vlastního rotoru generátoru je 1700kg m².

Vinutí rotoru i statoru jsou elektricky i mechanicky dimenzována na zatížení v pulsním režimu. Rovněž mechanické díly stroje včetně upevnění setrvačnicku jsou dimenzovány na mechanické zatížení odpovídající rázům 35MW a odolají i případným zkratům.

Buzení stroje je ze statického zdroje přes kroužky. Generátor je roztáčen pomocným asynchronním motorem napájeným z frekvenčního měniče. Spojení motoru s generátorem je pomocí pružné spojky. Vzhledem k tomu, že moment setrvačnosti motoru činí CCA 0,5 promile momentu setrvačnosti soustrojí je zatížení spojky od výkonových pulsů nízké a i při zkratu je namáhání na úrovni jmenovitého momentu motoru.

Chlazení motoru je vzduchové, vzduch je nasáván do stroje pomocí ventilátoru umístěného na stroji a poháněného asynchronním motorem a vyfukován přes tlumiče hluku mimo kontejner. Výkon motorů ventilátorů je cca 3kW pro 1 generátor. Do kontejneru je vzduch přiváděn kanálem z hlavní budovy nebo přes filtry a tlumiče hluku z okolního venkovního prostředí. Celkové množství přiváděného vzduchu pro obě soustrojí činí 5m³/s.

Olejová stanice

Olejová stanice je společná pro oba generátory.

Bude umístěna v hlavní budově na úrovni minimálně 1m pod úrovní patek generátoru. Bude umístěna ve vaně zamezující únik oleje do okolního prostředí při eventuální poruše armatur nebo potrubí. Stanice bude vybavena záložním čerpadlem a automatickým přepnutím na zálohu při poruše hlavního čerpadla.

Součástí stanice budou vysokotlaká čerpadla pro rozběh a doběh soustrojí. Nouzový doběh soustrojí při výpadku napájení bude řešen ve spolupráci s výrobcem ložisek. Stanice bude vybavena ohřevem a chlazením oleje a přístroji potřebnými pro kontrolu a řízení funkce stanice.

Předpokládané rozměry stanice jsou 2 x 1,5 x 1,5m. Výkon motorů čerpadel pro oběh a chlazení oleje je 6kW. Provoz stanice je bezobslužný.

Poháněcí motor

Poháněcí motor předpokládáme typ Siemens 1LG4317-4PM8, tvar IMB3, krytí IP55⁹, velikost 315L.

Motor je speciálně navržen pro provoz z frekvenčního měniče.

Jmenovitý výkon motoru je 200kW při 1490 1/min a napětí 690V, účinnost motoru 96,1%.

Spojení motoru s generátorem bude pružnou spojkou.

Motor bude umístěn na společné základové desce s generátorem.

Protihlukový kryt (-kontejner)

Protihlukový kryt bude společný pro obě soustrojí a bude tvořit stěny kontejneru. Bude modulární konstrukce s odnímatelnou střechou. Bude proveden z materiálů vhodných pro venkovní prostředí a konstruován s ohledem na zatížení sněhovými srážkami.

Úroveň hluku měřená ve vzdálenosti 1m od stěn kontejneru bude ≤ 70 dB (-akustický tlak).

⁹ Krytí proti prachu částečně a proti tryskající vodě ve všech směrech.

5.2.5.2 Technická specifikace generátoru (85Hz)

Výrobce	ČKD NOVÉ ENERGO,a.s.		
Typ generátoru	5A286-06H		
Počet pólů	6		
Množství	2		
Jmenovitý zdánlivý výkon	kVA	50000	
Jmenovitý činný výkon	kW	35000	
Jmenovité napětí	V	6000± 5%	
Jmenovitý proud	A	4800	
Jmenovitý moment	kN.m	205	
Jmenovitá frekvence	Hz	85	
Účinník	cos φ	0,70	
Jmenovité otáčky	min ⁻¹	1700	
Zkušební otáčky	min ⁻¹	1870	
Budič	STATICKÝ		
Jmenovité budicí hodnoty při cos φ=0,7	V; A	330V,1100A	
Buzení naprázdno	V; A	80V,350A	
Účinnost			
při cos φ=0,70	zatížení	100 %	96,0%
	zatížení	75 %	96,4%
	zatížení	50 %	96,6%
Celkové ztráty při jmenovitém zatížení			1500± 10 %
Reaktance			Nenasyc.
			nasyc.
Synchronní podélná	x_d	%	221
Přechodná podélná	x'_d	%	46
Rázová podélná	x''_d	%	24
Synchronní příčná	x_q	%	134
Rázová příčná	x''_q	%	18
Zpětná	x_2	%	20
Nulová	x_0	%	5
Časové konstanty			
Přechodná podélná naprázdno	T'_{do}	s	2,1
Přechodná podélná nakrátko	T'_d	s	0,40
Rázová podélná nakrátko	T''_d	s	0,050
Rázová stejnosměrné složky	T_a	s	0,04
Moment setrvačnosti (J)	kg.m ²		1700+6000setr.
Spojení statoru	Y		

Jmenovité budicí hodnoty platí pro buzení z vlastních svorek. Pro buzení ze sítě bude tento budič dimenzován na 100V, 400A – (buzení naprázdno pro 6600V, 85Hz)

Tab. 5-7 Technická specifikace generátoru (85Hz) [8]

5.2.5.3 Technická specifikace generátoru (65Hz)

Výrobce	ČKD NOVÉ ENERGO,a.s.		
Typ generátoru	5A286-06H		
Počet pólů	6		
Množství	2		
Jmenovitý zdánlivý výkon	kVA	50000	
Jmenovitý činný výkon	kW	35000	
Jmenovité napětí	V	6000± 5%	
Jmenovitý proud	A	4800	
Jmenovitý moment	kN.m	270	
Jmenovitá frekvence	Hz	65	
Účinnost	cos φ	0,70	
Jmenovité otáčky	min ⁻¹	1300	
Zkušební otáčky	min ⁻¹	1870	
Budič	STATICKÝ		
Jmenovité budičí hodnoty při cos φ=0,8	V; A	380V,1300A	
Buzení naprázdno	V; A	120,500A	
Účinnost			
při cos φ=0,7	zatížení	100 %	95,8
	zatížení	75 %	96,2
	zatížení	50 %	96,3
Celkové ztráty při jmenovitém zatížení			1540± 10 %
Reaktance			Nenas nasyc.
Synchronní podélná	x _d	%	170 140
Přechodná podélná	x' _d	%	35 31
Rázová podélná	x'' _d	%	18 15
Synchronní příčná	x _q	%	103 86
Rázová příčná	x'' _q	%	15
Zpětná	x ₂	%	16
Nulová	x ₀	%	4
Časové konstanty			
Přechodná podélná naprázdno	T'	s	1,90
Přechodná podélná nakrátko	T'	s	0,36
Rázová podélná nakrátko	T	s	0,045
Rázová stejnosměrné složky	T	s	0,04
Moment setrvačnosti (J)		kg.	1700+6000setr.
Spojení satoru		Y	

Jmenovité budičí hodnoty platí pro buzení z vlastních svorek.

Tab. 5-8 Technická specifikace generátoru (65Hz) [8]

6 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ NAPÁJECÍ SOUSTAVY PO REALIZACI

Ověření parametrů je důležité z hlediska správného provozu a pro eliminaci havárií a nepřijatelných stavů. Toto ověření se provádí zkouškami prvků vyráběných v sériové výrobě. Tyto zkoušky jsou pro daná zařízení normované. Je samozřejmé, že pro každý prvek je postup rozdílný. Avšak vždy spočívá v měření napětí, proudů, odporů a impedancí. Zkoušky se provádí v několika fázích. První fáze se děje součásti, ze kterých jsou utvořeny soustavy. Například u transformátorů se provádí zkoušky v době, kdy přichází z výroby. Jedná se o zkoušky nakrátko, naprázdno. Z naměřených hodnot se zjistí stav zařízení (v našem případě transformátoru). Potom je tento transformátor převezen na místo instalace a opět se musí provést zkouška, jestli je transformátor v pořádku, jestli nedošlo k poškození při převozu... Nejedná se jen o typy zařízení jako jsou generátory, transformátory, ale i zde hraje roli umístění ochrany, jejich příslušenství a správná funkčnost blokování. V posledním stupni zkoušek, kdy jsou již tyto prvky nainstalovány, zatěžují se postupným zvyšováním napětí a sleduje se jejich teplotní stav až při nastavení jmenovité hodnoty. Takovéto zkoušky provádí výrobce nebo pracovníci tím pověřené. Takto popsaný typ zkoušek se nazývá:

6.1 Přejímka ve výrobním závodě

6.1.1 zařízení elektro

- kontrola dle platné dokumentace
- kontrola elektro měření odporů a izolace
- kontrola příslušenství, ochrany a blokování
- chod naprázdno
- chod se zatížením a kontrola tepelné bilance
- měření a kontrola garantovaných parametrů

6.1.2 řídicí systém

- kontrola HW a vazeb na technologii
- zkoušky vstupů / výstupů
- zkoušky funkčních bloků SW

6.2 Napět'ová zkouška proti zemi

Tato zkouška se týká Veškerých použitých kabelů. Provádí se tak, že všechny žíly v kabelu jsou spojeny „v jeden“. V další fázi se na tento kabel připojí zkušební napětí, které je zkoušeno podle příslušných norem a dle příslušného napětí. Tímto se zjišťuje provozuschopnost vodičů.

6.3 Zkoušky kabelů 6kV

Jedná se o zkoušku izolačního odporu žil mezi sebou. Tedy se měří vzájemná izolace žil v kabelu.

6.4 Měření velikosti odporu zemnicí soustavy.

Smyslem této zkoušky je důležité změřeni, jak kvalitně je soustava uzemněna. Teď se jedná o soustavu před rozvodnou. Protože soustava kterou napájí tokamak je izolovaná. Ale soustava z generátoru... je klasicky uzemněná. Proto je nutné změřit impedanci uzemnění, která je podle normy daná a hodnota se liší ve velikosti přenášeného napětí.

6.5 Měření izolačního odporu zařízení TOKAMAKU.

Soustava z níž se napájí tokamak musí být izolovaná, jak je vidno z Obr 5-1 až Obr. 5-4. Tato zkouška je důležitá z hlediska dobré funkčnosti tokamaku. Pokud by nebyla splněna dostatečná izolace, mohlo by dojít k deformaci polí v tokamaku. Proto se zjišťují svodové proudy do Země a měří se impedance, kterou má tato izolace.

6.6 Sekundární zkoušky ochran 6kV.

Na ochrany se připojí měřicí transformátor, kterým se nastaví proud podle toho na jaký proud je ochrana navržena a poté se začne proud zvyšovat. Zjišťuje se v jakém čase ochrana vybaví. Tímto se zkouší nastavení ochran.

6.7 Zkouška funkčnosti řízení usměrňovačů snížením napětím

Na přípojnice 6kV přivedeme 0,4V a zkusíme usměrňovače až do maximálního výkonu daného zdroje 400V. Zkouška se provádí z důvodu aby nedošlo ke spálení měničů nebo dokonce ke zničení tokamaku. Přesněji ke zničení jeho cívek. Připojíme tedy nižší napětí, postupně ho zvyšujeme až na hodnotu 380V. Přitom zjišťujeme jaké napětí a proud máme na výstupu. Bude se tedy jednat o nižší proudy, které nám ale poví o funkčnosti měničů. Jakmile se doměříme a zjistíme, že konečné vinutí tokamaku je schopné řídit a tvarovat, zvýší se napětí až na jmenovitou hodnotu, tedy na 6kV a zjistíme provozní stav měničů.

6.8 Roztočení generátoru při provozu s pomocným buzením, pak s buzením vlastním.

Není možno generátor hned připojit na napětí 6kV. Toto napětí by ho mohlo znehodnotit bez předchozích testů a zkoušek. Proto se nejdříve roztáčí motor, kterým se roztáčí generátor. Tento motor se roztočí a nechá se běžet naprázdno, změří se oteplení a výstupní hodnoty. Pokud jsou hodnoty v normálu, může se na něj připojit generátor. Ten se bude rozbíhat na dané otáčky a na budící vinutí nebude připojeno 6kV, které je nutno k takovému nabuzení stroje aby dodával výše uvedený výkon. Bude tedy zpočátku připojeno napětí 380V a bude se zkoumat stroj při běhu naprázdno. Pokud bude vše v pořádku, přepínačem bude na buzení připojeno napětí o velikosti 6kV a poté se opět provedou zkoušky na generátoru, jestli dodává takové napětí a proudy v požadovaných hodnotách a pokud jeho oteplení je v normálu a jeho ochlazování pracuje správně.

6.9 Zkouška TOKAMAKU bez plazmy.

Při této zkoušce se testují jednotlivé cívky v tokamaku. Na cívky se připojí určitý zdroj, který bude dodávat do cívky proud a poté se zkoumá jestli cívka vytváří předepsané a potřebné magnetické pole a jestli se chová podle předepsaných požadavků. Po ozkoušení jednotlivých cívek dojde k zapojení celé soustavy cívek a zkouší se tato soustava a nahlíží se na vzájemné ovlivňování. Pokud vše proběhne v pořádku, může dojít ke zkoušce tokamaku s plazmou.

6.10 Zkouška TOKAMAKU s plazmou.

Jedná se o poslední zkoušku, která musí být na tokamaku provedena než dojde k provozování. Zkouška se provádí již s plazmou a jejím zapálení a sleduje se jak se chová magnetické udržení, jestli je vše v daných mezích a vinutí tak udržuje plazma aby se nedotkla nádoby nebo jestli má požadovaný tvar.

Po provedení těchto zkoušek je možno provozovat tokamak a provádět na něm výzkumy, pro které byl nainstalován. Tyto ověření funkčnosti netrvají den ani týden. Nýbrž k nim bude docházet v průběhu několika měsíců než se celkové zařízení uvede do provozu.

7 ZÁVĚR

Jak již bylo řečeno, tokamak je zkušební zařízení, které se zkoumá již od roku 1989, kdy bylo zapáleno první plazma. Řadu let před tím byly prováděny výzkumy plazmy a dalších okolností, které byly potřebné pro zrekonstruování tohoto vynálezu. Od té doby je po světě několik obdobných zařízení, na kterých se provádí spousta pokusů a testů, které pomáhají k objasnění problematiky jeho funkčnosti. Vývoj jde však rychle dopředu a nebojím se říci, že se tokamak bude používat do budoucna pro výrobu elektrické energie. Mé tvrzení však nespočívá v tom, že bude v provozu do roku 2050, jak uvádí prognózy, ale že někdy po tomto roce se bude vědět vše potřebné pro provoz a začne se tokamak rozšiřovat do celého světa v podobě energetického zdroje k vytváření elektrické energie, které šetří životní prostředí a má nekonečnou působost.

V práci dále uvádím funkční problematiku zařízení z obecného hlediska a vysvětluji problémy a složitosti, kterými tokamak oplývá.

Zabývám se detailněji jeho napájecí soustavou. Popisuji, jak se bude získávat potřebná energie pro jednotlivé pulsy a vysvětluji princip této cesty. V dalších bodech nastiňuji dimenzování kabelů v praxi, z hlediska jeho oteplení při pulzech a jeho provozu. Je zajímavé, že teplota vodičů za provozu stále stoupá. Proto je nutné dodržet provozní dobu soustrojí, která činí 8hodin. Za tuto dobu může být vyvinuto až 32 pulsů při dobrém uložení kabelů na lávce. Pochopitelně s horším uložení, kde nedochází k dostatečnému oteplování se počet těchto pulsů může měnit. Ale pro testovací prostředí našich fyziků i tento počet je dostačující.

Stojí také za zmínku počítání zkratových poměrů a přepočítání sousledné složky impedance navržených transformátorů, která se zjišťuje až nadměrným zjednodušováním. Je zde vidět, jak se v praxi postupuje při navrhování dílčích zařízení s porovnáním s tím, co říká teorie.

Lze říci, že se jedná o složité zařízení, které má v budoucích desetiletích velké uplatnění a které bude mít velký přínos pro energetiku a spolu s termonukleární syntézou přínos i pro lidstvo jako takové.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Compass míří do Prahy* [on line]. [cit. 14. 01. 2008]. <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=954&mark=>.
- [2] Elpro-Energo [on line]. [cit. 5. 03. 2008]. http://www.elpro-energo.cz/suche_transformatory.php
- [3] *Kablo energo* [on line]. [cit. 5. 03. 2008]. <http://www.kabloelektro.cz/CZ/index.htm>
- [4] ŘÍPA, M., WEINZETTL, V., MLYNÁŘ, J., ŽÁČEK, F. *Řízená termojaderná syntéza pro každého*. Praha, 2005, 100stran. ISBN 80-902724-7-9.
- [5] *Tokamak* [on line]. [cit. 15. 01. 2008]. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tokamak>
- [6] *Tokamak* [on line]. [cit. 15. 01. 2008] http://www.cez.cz/presentation/static/encyklopedie/vykladovy_slovník_energetiky/hesla/tokamak.html
- [7] *Tokamak COMPASS a jeho historie* [on line]. [cit. 15. 01. 2008]. <http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/compass/>
- [8] Ústav fyziky plazmatu akademie věd České Republiky ASOCIACE EURATOM / IPP.CR. *TECHNICKÁ SPECIFIKACE systému silového napájení pro tokamak COMPASS-D v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky*. Praha, Prosinec 2006.