

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
VYUŽITÍ MVE HNĚVKOVICE
PRO DODÁVKU SUROVÉ VODY
DO JE TEMELÍN PŘI SBO**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

SRPEN 2021

**BC.
LUDĚK
ZBORNÍK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zborník** Jméno: **Luděk** Osobní číslo: **456147**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití MVE Hněvkovice pro dodávku surové vody do JE Temelín při SBO

Název diplomové práce anglicky:

Utilization of the hydroelectric power plant Hněvkovice for the supply of raw water to the Nuclear power plant Temelín at station blackout

Pokyny pro vypracování:

1. Napsat rešerši současného stavu MVE Hněvkovice a čerpací stanice Hněvkovice.
2. Ověřit způsobilost startu ze tmy MVE Hněvkovice a provést návrh optimalizace.
3. Ověřit schopnost startu čerpadla čerpací stanice Hněvkovice pomocí MVE Hněvkovice a navrhnout opatření ke snížení záběrných proudů asynchronních motorů čerpadel.

Seznam doporučené literatury:

- [1] JIROUT, Josef. Vodní dílo Hněvkovice-Kořensko: Voda pro jadernou elektrárnu Temelín. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1988.
- [2] ČSN EN 60909-0 ED2 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů, Český normalizační institut, 2016
- [3] ČSN 38 1120 - Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren, 1994

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Dvořák, ČEZ. a.s.

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

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **13.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

Ing. Martin Dvořák
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Martinu Dvořákovi za poskytnutí cenných rad a připomínek. Dále bych rád poděkoval Martinu Dolanskému, Ing. Karlu Máslovi CSc. a Ing. Naděždě Pavelkové, Ph.D. za poskytnuté informace a celkovou spolupráci.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 11. srpna 2021

.....

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možností využití MVE Hněvkovice pro dodávku surové vody do JE Temelín při station blackout. Cílem bylo zanalyzovat současný stav a navrhnout optimalizaci pro separátní provoz MVE Hněvkovice a čerpací stanice Hněvkovice. V teoretické části byla provedena rešerše technologie MVE Hněvkovice a čerpací stanice Hněvkovice. V praktické části byl nejprve proveden návrh optimalizace najíždění MVE Hněvkovice, poté byly analyzovány možnosti pro úspěšné spuštění motoru hlavních čerpadel čerpací stanice Hněvkovice pomocí hydrogenerátoru MVE Hněvkovice a byl proveden výběr neoptimálnějšího řešení. Byla navržena změna nastavení nadproudových ochran pro separátní provoz MVE Hněvkovice a čerpací stanice Hněvkovice.

Klíčová slova: MVE Hněvkovice, čerpací stanice Hněvkovice, separátní provoz, hydrogenerátor, asynchronní motor, nadproudové ochrany, station blackout

ABSTRACT

This diploma thesis concerns the possibility of using the hydroelectric power plant Hněvkovice for the supply of raw water to the Temelín NPP at station blackout. The aim was to analyse the current state and propose optimisation for separate operations of the hydroelectric power plant Hněvkovice and the pumping station Hněvkovice. In the theoretical part, the research of the technology of the hydroelectric power plant Hněvkovice and of the pumping station Hněvkovice was performed. In the practical part, first a proposal for optimizing the start-up of the hydroelectric power plant Hněvkovice was made, then the possibilities for the successful starting of the engine of the main pumps of the Hněvkovice pumping station using the hydroelectric generator of the hydroelectric power plant Hněvkovice were analyzed and the most optimal solution was selected. It was proposed to change the setting of overcurrent protections for separate operations of the hydroelectric power plant Hněvkovice and the pumping station Hněvkovice.

Keywords: the hydroelectric power plant Hněvkovice, pumping station Hněvkovice, separate operation, hydrogenerator, asynchronous motor, overcurrent protection, station blackout

OBSAH

ÚVOD	11
KAPITOLA 1: POPIS VODNÍHO DÍLA HNĚVKOVICE A ČERPACÍ STANICE HNĚVKOVICE	13
1.1 VODNÍ DÍLO HNĚVKOVICE	13
1.1.1 Historie.....	13
1.1.2 Funkce vodního díla.....	13
1.1.3 Stavba.....	14
1.1.4 Malá vodní elektrárna Hněvkovice.....	14
1.1.4.1 Turbína	15
1.1.4.2 Hydrogenerátor	16
1.1.4.3 Vlastní spotřeba.....	16
1.1.4.4 Rozvodna 6,3 kV	17
1.1.4.5 Stejnoseměrné rozvody	18
1.1.4.6 Elektrické ochrany.....	18
1.2 ČERPACÍ STANICE HNĚVKOVICE.....	19
1.2.1 Čerpadla surové vody.....	20
1.2.2 Asynchronní motor hlavních čerpadel.....	20
1.2.3 Rozvodny a rozvaděče	23
1.2.4 Elektrické ochrany.....	24
KAPITOLA 2: SPUŠTĚNÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY HNĚVKOVICE PŘI SBO.....	25
2.1 STATION BLACKOUT JADERNÉ ELEKTRÁRNY TEMELÍN.....	25
2.1.1 Schopnost startu malé vodní elektrárny Hněvkovice při blackoutu	27
2.2 OPTIMALIZACE NAJÍŽDĚNÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY HNĚVKOVICE Z BEZNAPĚŤOVÉHO STAVU „BLACK START“	28
2.2.1 Návrh dieselgenerátoru pro malou vodní elektrárnu Hněvkovice	28
2.2.1.1 Model vlastní spotřeby malé vodní elektrárny Hněvkovice.....	30
2.2.1.2 Sekvence kroků během najíždění hydrogenerátoru.....	32
2.2.1.3 Výstup z programu SpecSizer	33
2.2.1.4 Dieselgenerátor DE165E3	34
2.2.1.5 Umístění dieselgenerátoru v prostorech malé vodní elektrárny Hněvkovice	34
KAPITOLA 3: SEPARÁTNÍ PROVOZ ČERPACÍ STANICE HNĚVKOVICE A MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY HNĚVKOVICE.....	36
3.1 SOUČASNÉ ŘEŠENÍ SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU HLAVNÍCH ČERPDEL ČERPACÍ STANICE HNĚVKOVICE	36
3.2 SIMULACE SPOUŠTĚNÍ PŘÍMÝM PŘIPOJENÍM NA SÍŤ ASYNCHRONNÍHO MOTORU HLAVNÍHO ČERPADLA V SEPARÁTNÍM PROVOZU S HYDROGENERÁTOREM MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY HNĚVKOVICE.....	38
3.3 SNÍŽENÍ ZÁBĚRNÝCH PROUDŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU HLAVNÍCH ČERPDEL..	39
3.3.1 Vysokonapětový softstartér.....	40
3.3.1.1 Ověření spouštění asynchronního motoru hlavního čerpadla pomocí vysokonapětového softstartéru	41
3.3.1.2 Hodnocení vysokonapětového softstartéru pro spuštění asynchronního motoru hlavních čerpadel v separátním provozu s hydrogenerátorem malé vodní elektrárny Hněvkovice	43
3.3.2 Vysokonapětový měnič frekvence.....	43

3.3.2.1	Vysokonapěťový měnič frekvence ACS 580 MV	44
3.3.2.2	Vysokonapěťový měnič frekvence ACS 2000.....	44
3.3.2.3	Topologie M ² C měniče od Siemensu	46
3.3.2.4	Simulace spouštění asynchronního motoru hlavních čerpadel s ACS 580 MV	47
3.3.2.5	Umístění vysokonapěťového měniče frekvence v čerpací stanici Hněvkovice	48
3.3.2.6	Hodnocení vysokonapěťového měniče frekvence pro spuštění asynchronního motoru hlavních čerpadel v separátním provozu s hydrogenerátorem malé vodní elektrárny Hněvkovice	49
3.4	ZKRATOVÉ POMĚRY PŘI SEPARÁTNÍM PROVOZU ČERPACÍ STANICE HNĚVKOVICE S MALOU VODNÍ ELEKTRÁRNOU.....	49
3.4.1	Náhradní zkratové impedance prvků	50
3.4.1.1	Zkratová impedance hydrogenerátoru malé vodní elektrárny Hněvkovice	50
3.4.1.2	Zkratové impedance kabelových vedení.....	51
3.4.2	Výpočet minimálního zkratového proudu	52
3.4.2.1	Výpočet minimálního zkratového proudu v místě A	52
3.4.2.2	Výpočet minimálního zkratového proudu v místě B	54
3.4.2.3	Výpočet minimálního zkratového proudu v místě C.....	56
3.5	ZKRATOVÉ POMĚRY V ČERPACÍ STANICI HNĚVKOVICE PŘI NAPÁJENÍ Z TR KOČÍN...58	
3.5.1	Náhradní zkratové impedance prvků pro výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu	58
3.5.1.1	Zkratové impedance síťového napáječe.....	59
3.5.1.2	Zkratová impedance vedení 110 kV TR Kočín — ČSH	59
3.5.1.3	Zkratové impedance T101	59
3.5.1.4	Zkratová impedance kabelového vedení od T101 do R6kV.....	60
3.5.2	Výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu	60
3.5.3	Výpočet nárazového zkratového proudu	61
3.5.3.1	Nárazový zkratový proud od síťového napáječe.....	62
3.5.3.2	Nárazový zkratový proud od hydrogenerátoru EHN.....	62
3.5.3.3	Celkový nárazový zkratový proud.....	62
3.6	OVĚŘENÍ CITLIVOSTI NADPROUDOVÝCH OCHRAN	63
3.6.1	Výpočet minimálního koeficientu citlivosti.....	63
3.6.2	Výsledky ověření citlivosti ochran v separátním provozu EHN a ČSH	63
	ZÁVĚR.....	65
	LITERATURA.....	67
	PŘÍLOHA A: PŘÍKLAD SEZNAMU SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	69
A.1	SEZNAM SYMBOLŮ.....	69
A.2	SEZNAM ZKRATEK.....	70
	PŘÍLOHA B: PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA NAPÁJENÍ ČERPACÍ STANICE HNĚVKOVICE	71
	PŘÍLOHA C: REPORT Z PROGRAMU SPECSIZER.....	72
	PŘÍLOHA D: PARAMETRY NAVRŽENÝCH VYSOKONAPĚŤOVÝCH MĚNIČŮ.....	76
	PŘÍLOHA E: PŘEHLED PARAMETRŮ OCHRAN V ČERPACÍ STANICI HNĚVKOVICE A MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNĚ HNĚVKOVICE.....	77

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Příčný řez EHN [4].....	15
Obrázek 2: Schéma rozvodny 6kV v EHN[4]	17
Obrázek 3: Vertikální čerpadlo HVBW 600	20
Obrázek 4: Strojovna ČSH – sekce čerpadel	21
Obrázek 5: Stator asynchronního motoru hlavního čerpadla.....	22
Obrázek 6: Trasa V1346 a V1347 z TR Kočín do ČSH s označenými stožáry [10].....	23
Obrázek 7: Dispoziční schéma SZN ETE [12].....	26
Obrázek 8: DE165E3 nekapotovaná verze [22].....	34
Obrázek 9: Průběh napětí a frekvence v R6kV při přechodu ČSH na separátní provoz s EHN [4].....	36
Obrázek 10: Průběh napětí v R6kV ČSH, proudu v R6kV a proudu hydrogenerátoru EHN při rozběhu motoru hlavního čerpadla z distribuční soustavy [9].....	37
Obrázek 11: Průběh proudu generátoru EHN při simulaci spouštění motoru hlavních čerpadel	38
Obrázek 12: Průběh napětí generátoru EHN při simulaci spouštění motoru hlavních čerpadel.....	39
Obrázek 13: Závislosti záběrného proudu a momentu na otáčkách asynchronního motoru při daném napětí sítě [28]	40
Obrázek 14: Momentové charakteristika asynchronního motoru hlavních čerpadel při jmenovitém napájení a při napájecím napětí odpovídající statorovému proudu I_{NG} hydrogenerátoru EHN.....	42
Obrázek 15: Blokové schéma vysokonapěťového měniče ACS 500 MV[32].....	44
Obrázek 16: Dostupné konfigurace ACS 2000 [34].....	46
Obrázek 17: Závislost proudu měniče na otáčkách asynchronního motoru[36]	47
Obrázek 18: Závislost výkonu na otáčkách asynchronního motoru[36]	47
Obrázek 19: Závislost momentu na otáčkách asynchronního motoru[36]	48
Obrázek 20: Schéma separátního provozu ČSH a EHN pro výpočet minimálního zkratového proudu	52
Obrázek 21: Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu v místě A.....	52
Obrázek 22: Průběh třífázového zkratového proudu při zkratu v místě A s maximální stejnosměrnou složkou .	53
Obrázek 23: Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu v místě B s postupným zjednodušováním	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technické parametry VD Hněvkovice [4].....	14
Tabulka 2: Technické parametry hydrogenerátor[4]	16
Tabulka 3: Technické údaje staniční baterie [4]	18
Tabulka 4: Nastavení generátorových ochran EHN [4].....	18
Tabulka 5: Parametry AM čerpadla surové vody [9].....	22
Tabulka 6: Ochrany 6 kV rozvodny BCG [4, 9]	24
Tabulka 7: Průběh zkoušky "Start ze tmy" EHN 10.04.2015 [4].....	27
Tabulka 8: Přehled spotřebičů vlastní spotřeby technologie jednoho hydrogenerátoru	31
Tabulka 9: Parametry asynchronního motoru hlavních čerpadel pro výpočet momentové charakteristiky [9]	41
Tabulka 10: Parametry prvků pro výpočty minimálních zkratových proudů při separátním provozu EHN a ČSH[4, 9]	50
Tabulka 11: Parametry prvků pro výpočet maximálního zkratového proudu při napájení z vedení 110 kV [9, 10]	58
Tabulka 12: Minimální koeficienty elektrických ochran dle [42]	63
Tabulka 13: Vypočtené hodnoty koeficientu citlivosti jednotlivých nadproudových ochran	63
Tabulka 14: Navrhované nastavení nadproudových ochran v EHN a ČSH	64

Obrázek 24: Průběh trojfázového zkratového proudu při zkratu v místě B s maximální stejnosměrnou složkou	55
Obrázek 25: Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu v místě C s postupným zjednodušováním	56
Obrázek 26: Průběh trojfázového zkratového proudu při zkratu v místě C s maximální stejnosměrnou složkou	57
Obrázek 27: Schéma soustavy pro výpočet souměrného rázového zkratového proudu	60
Obrázek 28: Náhradní schéma pro výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu s postupným zjednodušováním	61

ÚVOD

Jaderná bezpečnost byla, je a vždy bude nejdůležitějším aspektem při provozu jaderných elektráren. Za dobu existence jaderných elektráren, došlo ke třem významným haváriím, u kterých byla ohrožena jaderná bezpečnost, a to jak z důvodů lidského pochybení (Černobyl, Three Mile Island), tak z důvodů přírodní katastrofy (Fukušima). Tyto jaderné havárie uvrhly jaderný průmysl do recese. Např. Německo se po havárii ve Fukušimě utvrdilo v rozhodnutí vyřadit do roku 2022 jaderné elektrárny z energetického mixu [1]. V současné době dochází k pokusu o oživení jaderného průmyslu. Evropská unie se zavázala ke snížení produkce CO₂ ve všech odvětvích. Energetika je největší producent emisí CO₂ [2]. Proto některé země včetně České republiky vidí budoucnost své energetiky ve spolupráci jaderné energie s obnovitelnými zdroji elektrické energie a v technologiích uskladnění elektrické energie.

V České republice se nachází dvě jaderné elektrárny, které za rok 2020 vyrobily 30 TWh, což představuje 37 % z celkové vyrobené elektrické energie v České republice [3]. Starší z nich, jaderná elektrárna Dukovany, se nachází přibližně 24 km jihovýchodně od města Třebíč. Skládá se ze čtyř výrobních bloků s reaktory typu VVER 440 o nominálním výkonu 4 x 510 MW, při uvedení do provozu disponovala nominálním výkonem 4 x 440 MW. Zdrojem surové vody pro zásobování vnějších chladicích okruhů jaderné elektrárny Dukovany je vodní dílo Dalešice. Druhou jadernou elektrárnou je jaderná elektrárna Temelín (dále také ETE), která leží 6 km jihozápadně od města Týn nad Vltavou. ETE je tvořena dvěma výrobními bloky s reaktory typu VVER 1100 o nominálním výkonu 2 x 1100 MW. Zdrojem surové vody pro zásobování vnějších chladicích okruhů ETE je vodní dílo Hněvkovice. Vlastník a provozovatel jaderných elektráren v České republice je firma ČEZ, a.s.

Diplomová práce se bude zabývat využitím malé vodní elektrárny Hněvkovice (dále také EHN) pro napájení čerpací stanice ETE (dále také ČSH) při station blackout (dále také SBO) tzv. ztráta všech zdrojů napětí. ČSH se nachází na levém břehu vodního díla Hněvkovice a slouží k čerpání surové vody do dvou vodojemů o objemu 2x 15 000 m³ v ETE [4]. Odtud je surová voda dále distribuována do úpravně chladicí vody. Pomocí čiřicích pochodů se upraví na chladicí vodu, která slouží k nahrazení ztrát ve vnějších chladicích okruzích ETE. Dále je surová voda z vodojemů distribuována do chemické úpravně vody, kde dochází k výrobě demineralizované vody určené k doplnění ztrát v primárním a sekundárním okruhu ETE. Voda je z hlediska jaderné bezpečnosti nejdůležitější element. Proto je důležité se zabývat každou možností vylepšení, a to zejména při nestandardních událostech. SBO se řadí do nestandardní události. V moderní historii České republiky nedošlo ke stavu SBO. Přesto je důležité, aby provozovatel byl na takovou situaci připraven.

EHN není v současné době schopné “startu ze tmy”, jelikož nedisponuje najížděcím zdrojem, který by napájel zařízení nutná ke spuštění a následného připojení hydrogenerátoru EHN k vlastní spotřebě EHN. Pokud by bylo EHN doplněno o najížděcí zdroj mohlo, by být využito pro řešení SBO. Pro svůj nízký instalovaný výkon a malý zásobní objem vody v nádrži by se jednalo pouze o pomocný zdroj. Jsou vytvořené studie, ve kterých je ověřena možnost spuštění a separátní provoz čerpadla primárního okruhu pomocí EHN. Hlavním zdrojem pro dodávku elektrické energie pro vlastní spotřebu ETE při SBO by byla vodní elektrárna Lipno I s výkonem 2x60 MW [5]. Proto se hledá další možné využití EHN při SBO. Jedna z možností je využití EHN ke spuštění motoru hlavního čerpadla ČSH a následného provozu v separátním režimu. V současné době je motor hlavního čerpadla ČSH spouštěn přímým připojením na napájecí síť. Při tomto druhu spuštění dochází k vysokým hodnotám záběrných proudů (až sedmi násobku proudu jmenovitého). Na takové proudy není hydrogenerátor EHN konstruován, proto bude nutné navrhnout optimalizaci rozběhu motoru hlavního čerpadla ČSH. Eliminace záběrných proudů při rozběhu asynchronního motoru ČSH bude hlavním úkolem této diplomové práce. Jelikož separátní provoz EHN a ČSH je mimo projektový stav, bude nutné ověřit nastavení jednotlivých elektrických ochranných v EHN a ČSH. V neposlední řadě bude navržen najížděcí zdroj pro EHN.

KAPITOLA 1: POPIS VODNÍHO DÍLA HNĚVKOVICE A ČERPACÍ STANICE HNĚVKOVICE

1.1 Vodní dílo Hněvkovice

1.1.1 Historie

Vodní dílo (VD) Hněvkovice společně s VD Kořensko tvoří nejmladší stupeň Vltavské kaskády. Koncept přehrady u Hněvkovic byl plánován už na počátku stavby Vltavské kaskády. Výstavba VD Kořensko měla navazovat na výstavbu VD Orlické přehrady, aby řešila hygienicko-estetické závady vznikající při kolísání hladiny na konci vzdušné nádrže Orlické přehrady. V roce 1978 dostalo Ministerstvo lesního a vodního hospodářství ČSSR úkol zabezpečit technologickou vodu pro plánovanou jadernou elektrárnu v jižních Čechách pomocí výstavby přehrady na řece Vltavě. Jednalo se o úkol s mimořádnými požadavky na odběr vody, protože se u jaderné elektrárny vyžaduje jak zajištění dostatečného množství technologické vody, tak i spolehlivost dodávky vody ve všech hydrologických situacích. Dále musely být zohledněny požadavky na ochranu životního prostředí a maximálního využití hydrostatického potenciálu vody. V úvahu pro vyřešení těchto problémů byla řada variant, např. odběr technologické vody z nádrže VD Orlické přehrady, odběr technologické vody z nádrže VD Kořensko a odběr technologické vody z nádrže VD Hněvkovice. VD Hněvkovice bylo vyhodnoceno jako nejlepší varianta. První investiční záměr předpokládal zahájení výstavby v dubnu 1981 s dokončením v březnu 1986. Záměr obsahoval i rozšíření koryta řeky Vltavy mezi VD Hněvkovice a VD Kořensko a likvidaci jezů, které se zde nacházely. Při těchto změnách mohla VE Hněvkovice disponovat výkonem 2 x 16,70 MW. Po prozkoumání investičního záměru orgánem státní expertizy došlo k přepracování projektu. Instalovaný výkon klesl na současných 2 x 4,80 MW z důvodu snížení rozsahu prací na korytě řeky Vltavy mezi VD Hněvkovice a VD Kořensko. Stavba VD Hněvkovice započala 15. srpna 1986 a byla dokončena v roce 1992. [6]

1.1.2 Funkce vodního díla

VD Hněvkovice společně s nádrží VD Lipno I zajišťují minimální průměrný denní průtok ve Vltavě pod nádrží VD ve výši $6,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a průměrný denní průtok $9,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pod soutokem Vltavy s Lužnicí [7]. Zabezpečuje odběr dostatečného množství surové vody pro ETE v maximální výši $47\,000 \text{ tis} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ [7]. Odtok z nádrže slouží k výrobě elektrické energie. Nádrž slouží dále k rybímu hospodářství, k udržování kvality vody a hygienických podmínek, k plavbě, rekreaci a vodním sportům. V neposlední řadě slouží jako ochrana před povodněmi. [4]

1.1.3 Stavba

Jedná se o VD s betonovou tížní hrází o výšce 16,5 m se třemi korunovými bezpečnostními přelivy. Šířka jednotlivých bezpečnostních přelivů je 12 m. Jsou hrazeny ocelovými segmentovými uzávěry o výšce 7 m. Koruna bezpečnostních přelivů se nachází na kótě 364,60 m n. m. Jejich kapacita činí $1\,010\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ při maximální hladině 370,10 m n. m [4]. V současné době dochází k úpravě bezpečnostních přelivů firmou Metrostav, a.s. Po úpravě dojde k navýšení kapacity bezpečnostních přelivů na $1\,975\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ [8]. Při maximální vodní hladině nádrž obsahuje 22,15 mil. m^3 vody [7]. Po odečtení 8,94 mil. m^3 nutných pro udržení stálého nadržení dostáváme zásobní objem 13,21 mil. m^3 [7]. Na pravém břehu se nachází plavební komora pro lodě o maximální nosnosti 300 t. Na opačné straně v prodloužení paty hráze se nachází EHN. [4]

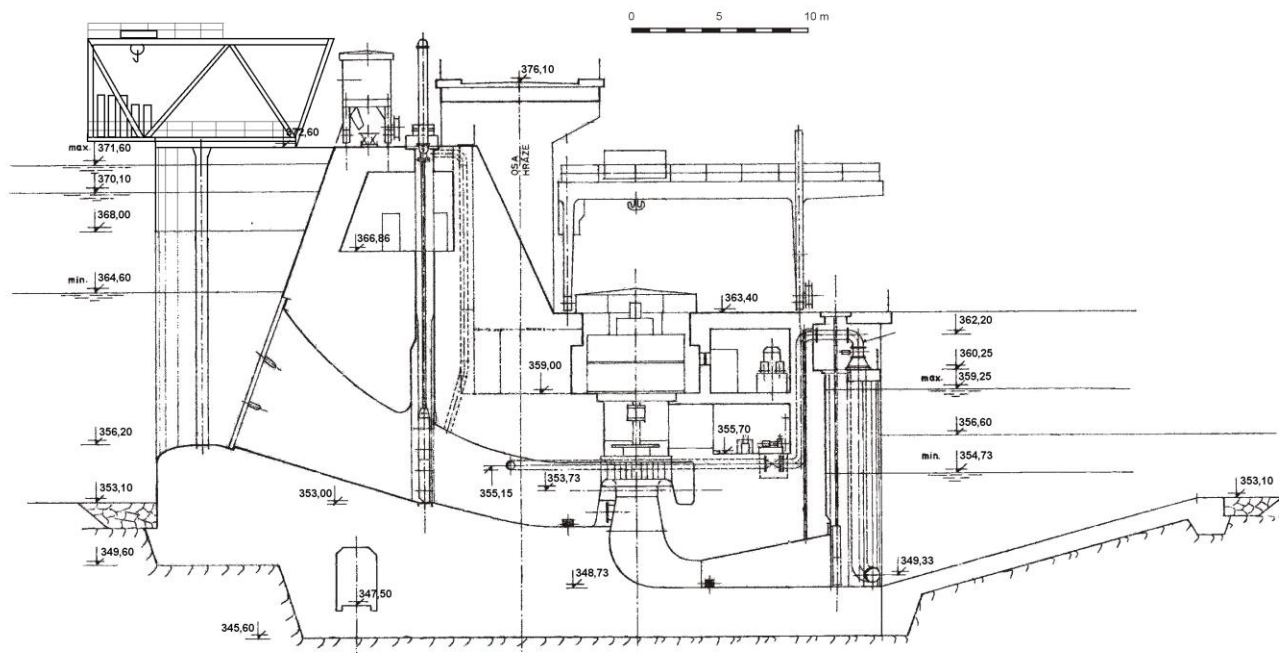
Tabulka 1: Technické parametry VD Hněvkovice [4]

Nádrž	
Celkový objem	22,15 mil. m^3
Stálé nadržení	8,94 mil. m^3
Zásobní objem	13,21 mil. m^3
Bezpečnostní přelivy	
Typ přelivu	Korunový
Počet	3
Šířka	12 m
max. kapacita	$1010\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Typ uzávěru	Ocelový segment
Výška uzávěru	7 m
Plavební komora	
Šířka	6 m
Délka	45 m
Nosnost	300 t
EHN	
Typ turbíny	Kaplanova
Počet soustrojí	2
Maximální hlnost	$30\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Maximální spád	14,8 m
Minimální spád	9,3 m

1.1.4 Malá vodní elektrárna Hněvkovice

EHN je průtočná až pološpičková vodní elektrárna, která se nachází na levé straně hráze VD Hněvkovice v bloku základové části. Skládá se ze dvou soustrojí vertikálního typu s Kaplanovými turbínami typu 4—K—69, betonovou spirálou a savkou. S hydrogenerátorem jsou turbíny spojeny pevnou spojkou. Elektrárna je plně automatizovaná. Řízení probíhá z centrálního

dispečinku vodních elektráren ČEZ, a.s. ve Štěchovicích. V případě potřeby lze ovládat elektrárnu přímo z EHN. [4]



Obrázek 1: Příčný řez EHN [4]

1.1.4.1 Turbína

Jedná se o vertikální turbínu typu 4—K—69, která je při pohledu shora levotočivá. Regulace výkonu turbíny je prováděna pomocí rozváděcích a oběžných lopatek. Celkem 24 natáčivých rozváděcích lopatek je ovládáno pomocí klikového mechanismu složeného z dělených regulačních klik a regulačních táhel. Pomocí tohoto mechanismu dochází k přenosu sil dvou servomotorů na rozváděcí lopatky a k jejich společnému ovládnutí. Rozváděcí lopatky jsou z lité oceli. [4]

Oběžné kolo se sestává ze čtyř nastavitelných oběžných lopatek. Natáčení oběžných lopatek je řízeno pomocí servomotoru a mechanismu natáčení přímo v oběžném kole. Lopatky jsou odlity z korozivzdorného materiálu odolného vůči korozi a kavitaci. [4]

Důležitým zařízením pro ochranu turbíny jsou zavzdušňovací ventily. Na turbíně se nachází dva zavzdušňovací ventily, které jsou umístěny v prostoru víka turbíny. Jejich úkolem je zamezení zpětného rázu vody, který vzniká při rychlém uzavírání rozváděcího kola. Setrvačností vody v savce po uzavření rozváděcího kola dochází v prostoru turbíny k podtlaku. Tento podtlak způsobí otevření zavzdušňovacích ventilů. Do mezilopatkového prostoru se dostane vzduch, tím se vytvoří vzduchový polštář, který zabrání nárazu zpětného vodního sloupce na oběžné lopatky, nebo jej minimálně ztlumí. [4]

1.1.4.2 Hydrogenerátor

Hydrogenerátor je umístěn v kobce zapuštěné ve spodní stavbě a je krytý vodotěsným krytem. Je konstruován v tepelné izolační třídě F pro rotor i stator. Chlazení je realizováno vzduchem, obsahuje vlastní uzavřený cirkulační ventilační systém. Chladicí vzduch se ochlazuje ve vodních chladičích. Pro udržení teploty hydrogenerátoru v provozních mezích v době nečinnosti jsou v hydrogenerátoru zabudována čtyři topná tělesa o výkonu 1000 W. K zapínání topných těles dochází pokud teplota vinutí hydrogenerátoru klesne pod 15 °C a vypínají při dosažení 25 °C kovových částí hydrogenerátoru. [4]

Rotor hydrogenerátoru je veden dvěma radiálními vodicími ložisky a nesen závěsným ložiskem. Závěsné ložisko zachycuje axiální síly rotujících hmot rotoru soustrojí včetně hydraulického tahu turbíny. Odstředivé síly a síly magnetického tahu zachycují vodicí ložiska synchronního stroje spolu s turbínovým vodicím ložiskem. Ložiska soustrojí jsou dimenzována na dvouminutový chod o plném výkonu po ztrátě průtoku chladicí vody. Pokud do dvou minut nedojde k obnovení průtoku chladicí vody musí dojít k odstavení soustrojí. Na obvodu rotoru věnce je vsazeno 28 vyniklých pólů rotoru, které jsou složeny z výlisků oboustranně lakovaných plechů o síle 1 mm stažených litými deskami. Póly obsahují tlumicí vinutí jsou vyrobeny z měděných tyčí. Dále jsou na pólech nasazeny cívky budicího vinutí, které jsou vinuty z Cu pásků. Vinutí jsou vyvedena na kroužky. [4]

Budicí proud pro napájení rotorových vinutí je přiváděn ze stacionárního budiče ke kartáčovým roubíkům kabelovým vedením. Kartáčové roubíky jsou izolovaně upevněny na nosiči sběracího ústrojí. Pomocí uhlíkových kartáčů je přiváděn budicí proud na kroužky rotoru. [4]

Tabulka 2: Technické parametry hydrogenerátor[4]

Hydrogenerátor G1, G2		
Zdánlivý výkon	S_n	5 400 kVA
Činný výkon	P_n	4 320 kW
Jmenovité napětí	U_n	6,3 kV
Jmenovitý účinník	$\cos\varphi_n$	0,8
Jmenovitý proud	I_n	495 A
Budicí proud	I_b	(224—426) A
Budicí napětí	U_b	(32—88) V
Jmenovité otáčky	n_n	214,3 min ⁻¹
Moment setrvačnosti	J	120 000 kg·m ²

1.1.4.3 Vlastní spotřeba

Napájení vlastní spotřeby je zajištěno ze dvou na sobě nezávislých zdrojů. Primárním zdrojem vlastní spotřeby je transformátor (vlastní spotřeby) napájený z pole R6kV, který je

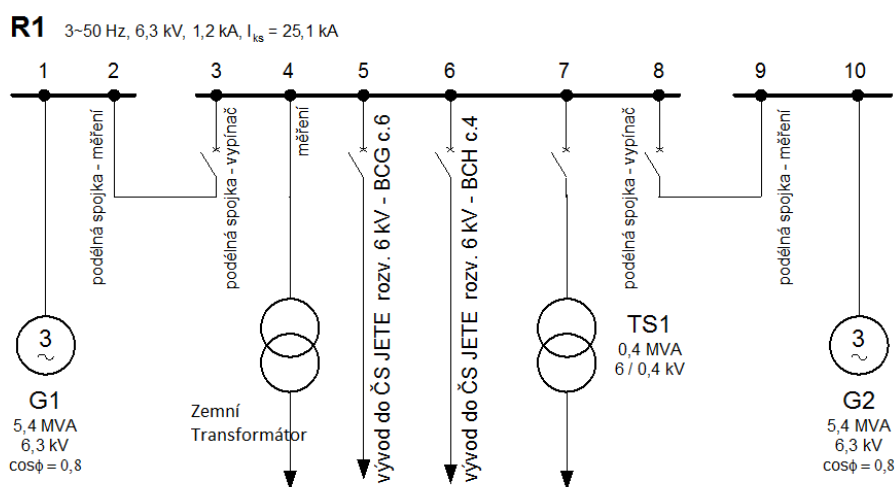
připojen k rozvodnám ČSH. Záložní napájení je zajištěno z objektu Povodí Vltavy. Objekt je připojen na vnější energetickou síť 22 kV. Oba přívody napájení vlastní spotřeby jsou přivedeny do prvního pole hlavního rozvaděče 0,4 kV. Paralelní provoz těchto přívodů je nepřípustný. [4]

Hlavní rozvaděč se sestává ze šesti jednostranných polí. První pole je přívodní, ostatní vývodové. Z hlavního rozvaděče jsou napájeny dva strojové rozvaděče, každý strojový rozvaděč napájí technologii jednoho soustrojí. Dále jsou z hlavního rozvaděče napájeny společná zařízení, světelné a zásuvkové obvody a rozvaděč provozního objektu. [4]

1.1.4.4 Rozvodna 6,3 kV

Pomocí rozvodny 6,3 kV je vyveden výkon obou soustrojí. Rozvodna je rozložena na tři části. První část se skládá ze dvou polí. Do pole č. 1 je přiveden výkon z hydrogenerátoru **G1**, dále obsahuje měření pro ochrany a synchronizační systém. V poli č. 2 je podélná spojka, měření pro buzení generátoru a vývod ke generátorovému vypínači pro **G1**. Druhá část se skládá ze šesti polí. Pole č. 3 (podélná spojka) je vybaveno generátorovým vypínačem VF-T 12.12.21 1250 A pro **G1**. Pole č. 4 je vybaveno měřením napětí na přípojnici. Pole č. 5 je vybaveno výkonovým vypínačem VF-T 12.12.31 1250 A, slouží k vyvedení výkonu do rozvodny BCG v ČSH. Pole č. 6 je vybaveno výkonovým vypínačem VF-T 12.12.31 1250 A, slouží k vyvedení výkonu do rozvodny BCH v ČSH. Pole č. 7 je vybaveno vypínačem VF-T 12.12.21 1250 A, zajišťuje napájení transformátoru 6/0,4 kV vlastní spotřeby. Pole č. 8 (podélná spojka) je vybaveno generátorovým vypínačem VF-T 12.12.21 1250 A pro **G2**. [4]

Třetí část slouží k vyvedení výkonu hydrogenerátoru **G2**. Pole č. 9 (podélná spojka) je vybaveno měřením pro buzení generátoru a vývodem ke generátorovému vypínači VF-T 12.12.21 1250 A pro **G2** a měření pro ochrany a synchronizační systém. [4]



Obrázek 2: Schéma rozvodny 6kV v EHN[4]

1.1.4.5 Stejnoseměrné rozvody

Stejnoseměrné rozvody v EHN jsou provedeny na napěťové hladině 110 Vss. Používají se jako základní ovládací napětí automatik soustrojí a společných zařízení, dále pro napájení akčních členů automatik soustrojí a společných zařízení, pro provozní signalizaci a pro nouzové osvětlení. Napájení důležitých zařízení a akčních členů se provádí ze dvou nezávislých systémů. Tím je zajištěna vyšší spolehlivost zařízení a bezpečnost provozu. Stejnoseměrné rozvody se skládají z jednoho stejnosměrného rozvaděče, dvou usměrňovačů (max. příkon 10,3 kVA, jmenovité napětí 110 Vss a max. vstupní proud 18,7 A) a dvou staničních baterií 110 V. [4]

Tabulka 3: Technické údaje staniční baterie [4]

Druh baterie	olovnaté
Jmenovité napětí	110 V
Jmenovitá kapacita	250 Ah
Počet článků	54
Provozní teplota	(+10 až +55) °C

1.1.4.6 Elektrické ochrany

Technologie EHN je chráněná pomocí digitální multifunkční ochrany Siprotec s digitálním zpracováním měření proudů a napětí. [4]

Jednotlivé generátory jsou opatřeny hlavní generátorovou ochranou a záložní ochranou. Vývody do ČSH chrání nadproudové ochrany se synchronizační funkcí. Uvedené ochrany jsou umístěné ve skříni ochran. Nadproudová ochrana chrání transformátor 6/0,4 kV (TRF vlastní spotřeby) je umístěná v rozvodně 6 kV. V rozvodně 6 kV se dále nachází zemní ochrana. [4]

Tabulka 4: Nastavení generátorových ochran EHN [4]

Napěťové ochrany generátoru EHN		
Stupeň	Ochrana	Hodnota
I	Hlavní	115 % / 3 sec (6,9 kV)
I	Záložní	121 % / 3 sec (7,3 kV)
II	Hlavní	130 % / 0 sec (7,8 kV)
II	Záložní	136 % / 0 sec (7,8 kV)
Nadproudové ochrany generátoru EHN		
Stupeň	Ochrana	Hodnota
I	Hlavní	650 A / 0,8 sec
I	Záložní	650 A / 0,8 sec
II	Hlavní	1500 A / 0,3 sec
II	Záložní	1500 A / 0,3 sec
Frekvenční ochrany generátoru EHN		
Stupeň	Ochrana	Hodnota
I	Hlavní	47 Hz / 3 sec
I	Záložní	47 Hz / 3 sec
II	Hlavní	46 Hz / 1 sec
II	Záložní	46 Hz / 1 sec

1.2 Čerpací stanice Hněvkovice

ČSH byla projektována a postavena pro zajištění dodávek surové vody pro ETE se čtyřmi výrobními bloky s tlakovodními reaktory VVER 1000. Na průtoky surové vody od 1,3 až do 4,16 m³·s⁻¹. Pro současné dva výrobní bloky je průměrný odběr surové vody 1,80 m³·s⁻¹ a maximální průtok 3,00 m³·s⁻¹. [9]

ČSH se nachází na levém břehu nádrže VD Hněvkovice. K dopravě surové vody slouží dva výtlačné řády DN 1600 o délce 6,20 km. Maximální průtok řádů je 4,80 m³·s⁻¹. K čerpání surové vody z nádrže VD Hněvkovice slouží celkem šest odstředivých čerpadel HVBW. Do každého výtlačného řádu jsou připojena tři čerpadla. ČSH obsahuje dva vtokové objekty, které jsou opatřeny zařízením pro předčištění vody, česlemi se shrabovacím mechanismem a stavidlovými uzávěry. K čerpadlům je předčištěná voda dopravena pomocí přívodního potrubí DN 1400 vybaveného klapkovým uzávěrem. Výtlačné potrubí za čerpadly je realizováno pomocí DN 600, opatřeno kuželovým uzávěrem, revizním šoupětem a napojeno na výtlačný řád DN 1400. Na vývodu z ČSH je výtlačný řád opatřen kulovými uzávěry DN 1400. Pro možnost propojení výtlačných řádů v případě poruchy, oprav, či revizí je použito potrubí DN 1400 vybavené kulovým uzávěrem DN 1400 (do jednoho výtlačného řádu mohou pracovat pouze tři čerpadla). Surová voda je čerpána do dvou vodojemů o objemu 2 x 15 000 m³, které se nacházejí přímo v areálu ETE. [9]

ČSH stanice je projektována na stav N-1. V případě výpadku jednoho elementu (hlavního čerpadla, výtlačného řádu, rozvodny 6kV) je schopna dodávat surovou vodu do ETE. Počet spuštěných čerpadel se odvíjí od spotřeby surové vody v ETE. V letních měsících je spotřeba surové vody vyšší, dopravu surové vody zajišťují jedno hlavní čerpadlo běžící 24 h denně a druhé připínané podle potřeby, povětšinou na 4-6 h denně v závislosti na venkovní teplotě vzduchu a teplotě čerpané surové vody z VD Hněvkovice. Naopak v zimních měsících je spotřeba surové vody nižší a dopravu surové vody zajišťuje pouze jedno hlavní čerpadlo běžící 24 h. [9]

Provoz ČSH je plně automatizován. Zapínání hlavních čerpadel se řídí podle výšky vodní hladiny ve vodojemech. Na provoz dohlíží směnový provozní elektrikář, který zabezpečuje kontrolu stavu zařízení podle harmonogramu pochůzkových kontrol. Dále zabezpečuje zajištění provozované technologie, její předání do údržby a převzetí technologie z údržby, její odjištění a uvedení do provozu. V případě závady, kterou nelze odstranit, oznámí závadu směnovému mistru elektro. [9]

1.2.1 Čerpadla surové vody

Jedná se o šest vertikálních čerpadel HVBW 600 vyrobených firmou Sigma Lutín navržených pro parametry $Q = 1,20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Y = 1\,618 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n = 740 \text{ min}^{-1}$. [9]



Obrázek 3: Vertikální čerpadlo HVBW 600

1.2.2 Asynchronní motor hlavních čerpadel

Hlavní čerpadla surové vody jsou poháněna asynchronními motory o výkonu 3 150 kW a jmenovitém napětí 6 kV.

Ve strojovně ČSH jsou čerpadla rozdělena do tří sekcí, každá po dvou čerpadlech. Jednotlivé sekce jsou umístěné do kójí. V případě nutnosti odstavení výtlačného řádu z důvodů prasknutí potrubí v blízkosti čerpadla, nebude ohrožena technologie druhé sekce pracující do druhého výtlačného řádu.



Obrázek 4: Strojovna ČSH – sekce čerpadel

Kostra statoru je svařovaná z ocelových plechů, což zajišťuje dostatečnou tuhost stroje. Uvnitř kostry jsou uloženy chladiče a potrubí chladicí vody. Na obvodě jsou umístěny dvě ventilační klapky se svými servopohony. [9]

Vinutí statoru je uloženo v drážkách statorových plechů, izolováno bezrozpouštědlovou impregnací v tepelné třídě „F“. Čela vinutí jsou zpevněná bandážovými kruhy. Fázové vývody statorového vinutí jsou vedeny do svorkové skříně a zakončeny na průchodkách. [9]

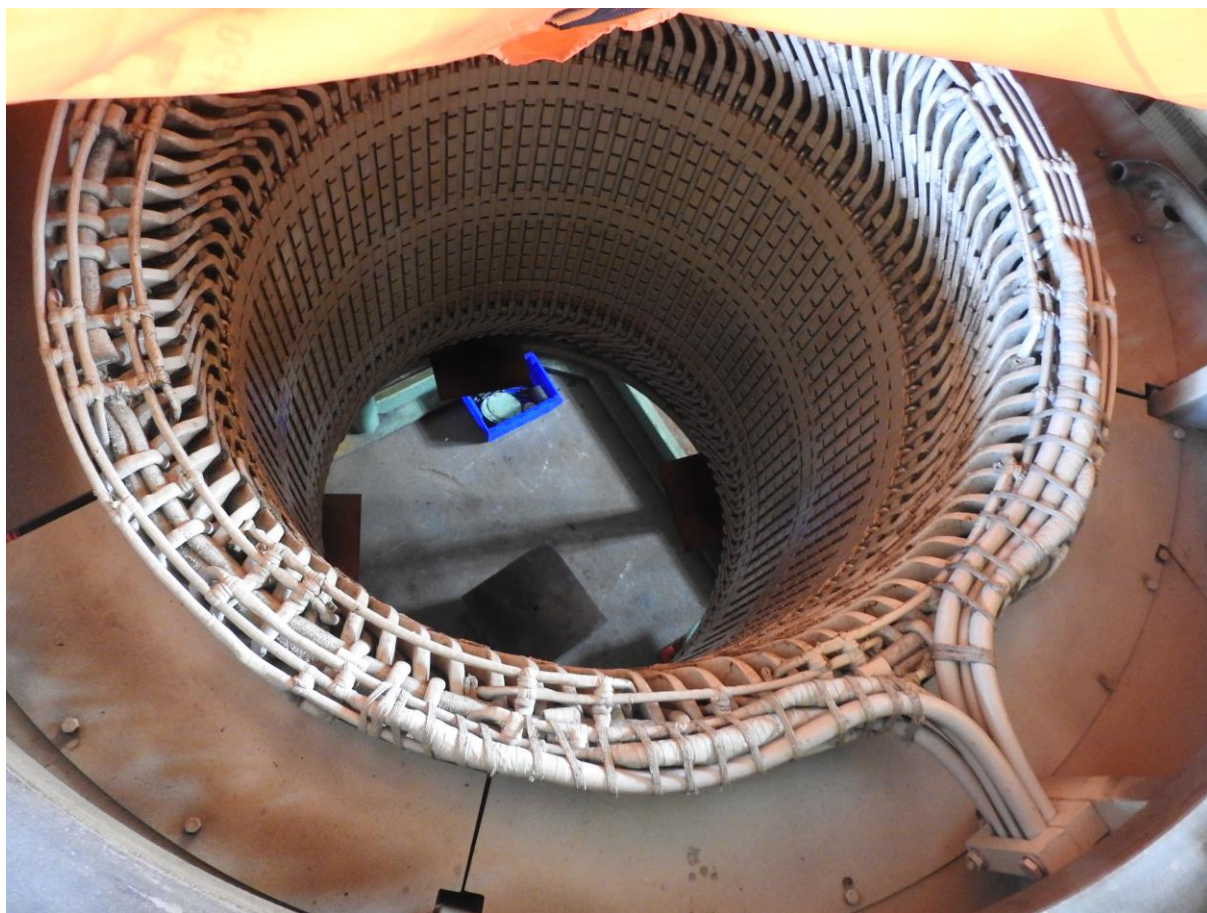
Rotor asynchronního motoru je složen z rotorových plechů, které jsou uloženy na rotorové hvězdici tvořené žebry navařenými přímo na hřídeli. Na rotorové hvězdici jsou uloženy dva radiální ventilátory. [9]

Motory jsou vybaveny dvojitým způsobem chlazení. Tzv. chlazením s uzavřeným vnitřním okruhem a chlazením s otevřeným okruhem. Při uzavřeném vnitřním okruhu je ohřátý vzduch vháněn do vodních chladičů a vrací se zpět do stroje. Cirkulace vzduchu je zajištěna dvěma radiálními ventilátory. V případě chlazení s otevřeným okruhem je chladný vzduch nasáván do stroje pomocí dvou radiálních ventilátorů a ohřátý vzduch vyfukován mimo stroj skrz dvě ventilační klapky. Chlazení s otevřeným okruhem je závislé na podmínkách ve strojovně ČSH. Provozuje se v případě, že maximální relativní vlhkost vzduchu nepřekročí 90 % a teplota vzduchu 20 °C. [9]

Spouštění motorů je prováděno přímým připnutím na napájecí síť. Čerpadla jsou spouštěna do uzavřených kuželových uzávěrů. U motoru jsou povoleny tři rozběhy ve studeném stavu nebo dva rozběhy v teplém stavu. V případě dalších rozběhů musí dojít k prodlevě 30 minut. [9]

Tabulka 5: Parametry AM čerpadla surové vody [9]

Typ	4V252 — 08V	
Jmenovitý výkon	P_n	3 150 kW
Jmenovité napětí	U_n	6 kV
Účinník při jmenovitém zatížení	$\cos \varphi$	0,87
Účinnost při jmenovitém zatížení	η	95,7 %
Jmenovitý moment	M_n	40,5 kNm
Záběrný moment	M_z	24,3 kNm
Moment setrvačnosti	J	600 kg.m ²
Jmenovitý proud	I_n	364 A
Záběrný proud	I_z	2075 A



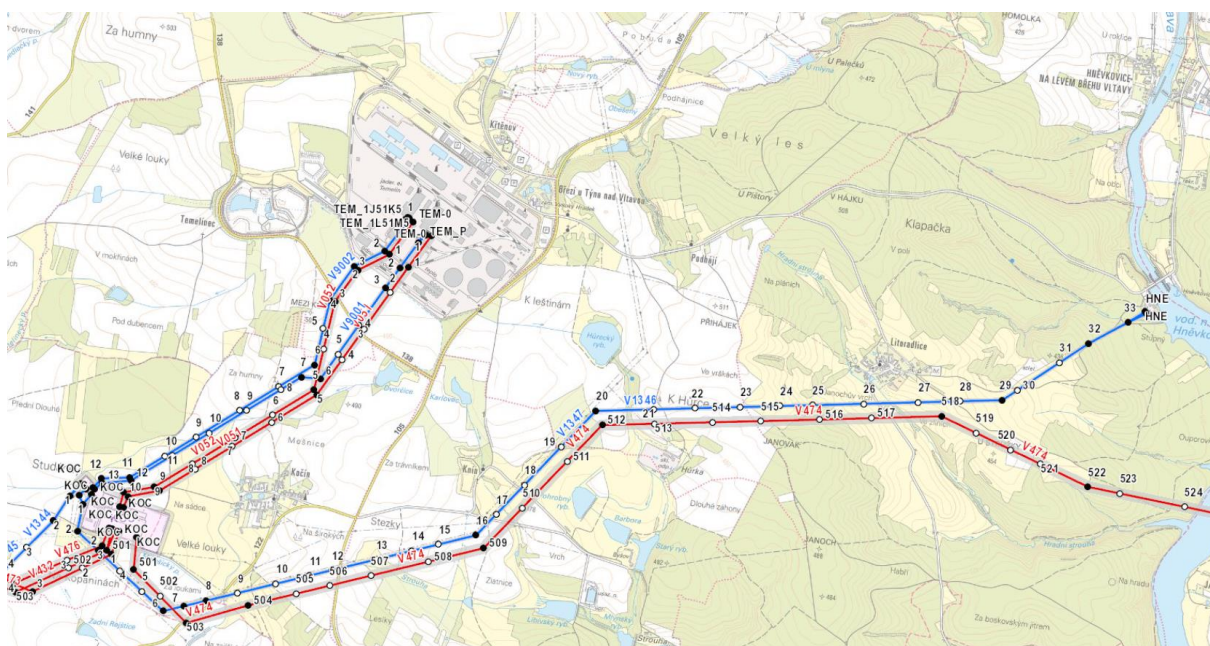
Obrázek 5: Stator asynchronního motoru hlavního čerpadla

1.2.3 Rozvodny a rozvaděče

Napájení ČSH je provedeno z TR Kočín dvěma vedeními 110 kV. Jedná se o paralelní vedení V1346 a V1347. Trasa vedení a umístění stožárů je znázorněno na **Obrázku 6**. Vedení ústí do venkovní rozvodny ČSH 110 kV AEC. Rozvodna je zapojena do „H“ ve zjednodušeném provedení s podélným dělením jedné hlavní přípojnice. AEC se sestává z pěti polí. Do polí AEC. 1 a AEC. 3 ústí 110 kV vedení. Pole jsou vybavena odpojovačem, měřícím transformátorem napětí (MTN) a zemnicími noži. Pole AEC. 2 a AEC. 4 obsahují přístroje (odpojovače, vypínače SIEMENS 3AP1FG, měřící transformátor proudu (MTP) a omezovač přepětí) umožňující připojení olejových transformátorů 110 / 6 kV, 25 MVA k elektrizační soustavě (dále také ES). Pole AEC. 11 je vybaveno odpojovací příčné spojky přípojnic.

Z transformátorů jsou napájeny rozvaděče BCG a BCH, které se sestávají z devíti polí. Slouží k vyvedení výkonu z EHN, napájení asynchronních motorů hlavních čerpadel a dvou úsekových transformátorů 6 / 0,4 kV určených pro napájení úsekových rozvaděčů BHL a BHM. Z těchto rozvaděčů jsou napájeny pohony 0,4 kV a podružné rozvaděče. Přehledové schéma napájení ČSH se nachází v **Příloze B**.

Stejnoseměrné rozvody v ČSH jsou provedeny na napěťové hladině 220 Vss. Slouží pro napájení ovládacích obvodů zařízení v rozvodně 110 kV, pro napájení ovládacích obvodů rozvaděčů BCG a BCH a pro napájení rozvodů nouzového osvětlení. Stejnoseměrné rozvody se skládají z jednoho stejnoseměrného rozvaděče OBUA 10, napájeného z dvou usměrňovačů a staniční baterie. [9]



Obrázek 6: Trasa V1346 a V1347 z TR Kočín do ČSH s označenými stožáry [10]

1.2.4 Elektrické ochrany

Chránění technologie ČSH je zajišťováno starými elektromechanickými a elektromagnetickými ochranami. Výjimku tvoří ochrany transformátorů T101 a T102, u kterých proběhla modernizace. Elektromechanické a elektromagnetické ochrany byly nahrazeny digitálními ochranami RET 615 a RET 630 od firmy ABB. V letošním roce se připravují investiční akce pro rekonstrukce 6 kV rozvodů ČSH, mimo jiné dojde k výměně starých elektromechanických a elektromagnetických ochrany za digitální ochrany RET 615.

Tabulka 6: Ochrany 6 kV rozvodny BCG [4, 9]

Chráněné zařízení	Typ	Ochranná funkce
Čerpadla surové vody	M205	Nadproudová zkratová časově závislá Kontrola rozběhu motoru Nesymetrická zátěž Tepelné přetížení
Vývod na EHN	AT31X A11	Nadproudová zkratová — časově závislá Nadproudová zkratová — časově nezávislá
Vývod na TRF vlastní spotřeby	AT31X A11 V15	Nadproudová zkratová — časově závislá Nadproudová zkratová — časově nezávislá Podpět'ová ochrana
Přívod od T101	RET615	Rozdílová Přetížení
Pole měření	GV12	Zemní spojení
Spojka BCH.01	AT31X	Nadproudová zkratová — časově závislá

KAPITOLA 2: SPUŠTĚNÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY HNĚVKOVICE PŘI SBO

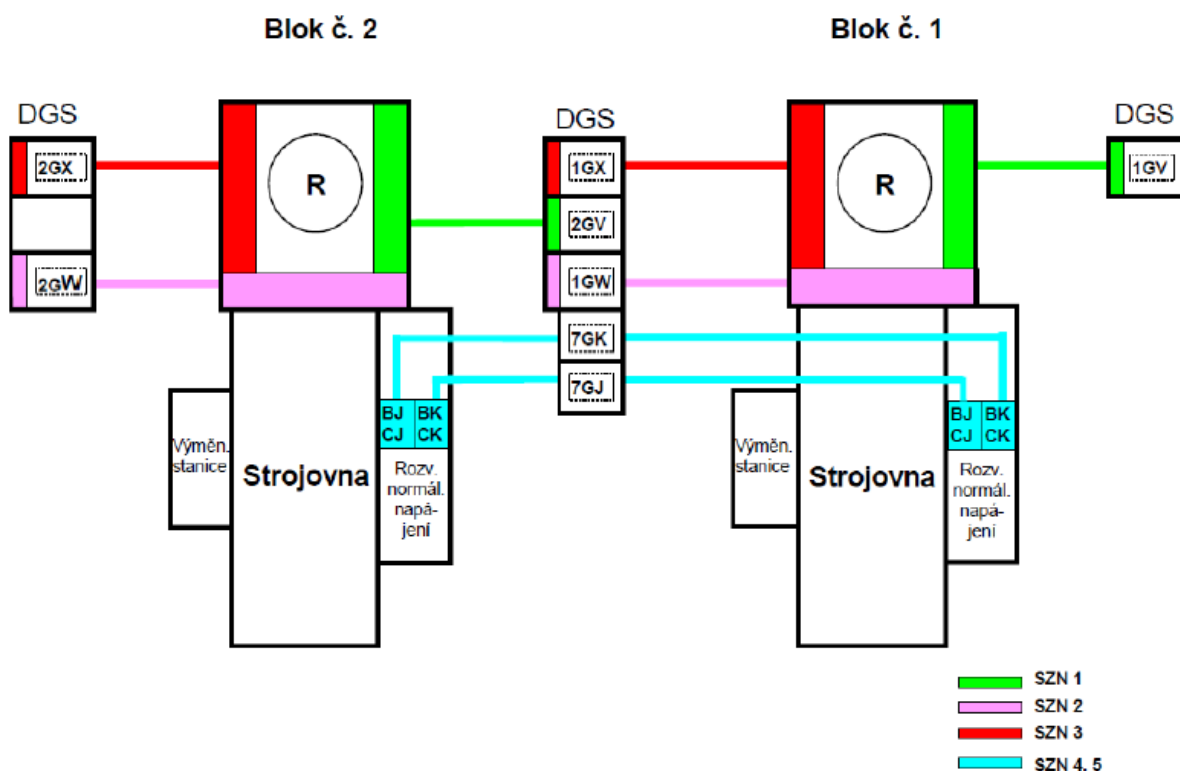
2.1 Station blackout jaderné elektrárny Temelín

Zdroje vlastní spotřeby zabezpečují dodávku elektrické energie požadovaného množství a definované kvality při všech provozních stavech [11]. Napájení elektrických zařízení vlastní spotřeby je na každém výrobním bloku ETE rozděleno na více rozveden, napájecích systémů a zdrojů. Elektrické spotřebiče jsou rozříděny do kategorií podle jejich důležitosti. Důležitost spotřebiče zahrnuje kritérium bezpečnostní funkce zařízení a minimální možnou dobu přerušení napájení. Pro napájení vlastní spotřeby jsou v ETE k dispozici zdroje pracovní, rezervní a nouzové. [12]

Pracovní zdroj obstarává napájení vlastní spotřeby při nominálním provozu elektrárny [11]. Pracovními zdroji vlastní spotřeby na každém výrobním bloku ETE jsou dva odbočkové transformátory s regulací napětí 63/31,5/331,5 MVA. Napájení odbočkových transformátorů může být provedeno buď přímo z turbosoustrojí při nominálním provozu bloku nebo z vedení 400 kV přes blokový transformátor. [12]

Rezervní zdroje jsou určeny pro napájení vlastní spotřeby v případě ztráty pracovního zdroje, které se stávají dvou rezervních transformátorů s regulací napětí 63/31,5/31,5 MVA napájené z vedení 110 kV. Rezervní transformátory jsou schopny zajistit odstavení jednoho bloku během ztráty pracovního zdroje a při zatížení spotřebiči druhého bloku. [12]

Nouzové zdroje slouží k napájení bezpečnostních systémů ETE, které jsou složeny na každém bloku ze tří divizí. V každé divizi se nachází jeden systém zajišťující napětí (dále také SZN). Každý ze SZN obsahuje nouzové zdroje, kterými jsou dieselgenerátor (dále také DG), každý o výkonu 6,3 MW a jmenovitém napětí 6,3 kV, akubaterie a agregáty nepřerušeno napětí (usměrňovače, střídače). Z důvodu zajištění nutné míry redundance jsou jednotlivé SZN nezávislé a vzájemně oddělené dispozičně, elektricky i z hlediska řídicího systému. Pro napájení částí systému, které nejsou důležité z hlediska jaderné bezpečnosti, ale zabezpečují ochranu osob a drahých technologií (turbosoustrojí) jsou na každém bloku vytvořené dva SZN (4, 5). Hlavním zdrojem pro tyto SZN jsou dva DG, každý o výkonu 6,3 MW a jmenovitém napětí 6,3 kV. Tyto DG jsou společné pro oba výrobní bloky ETE. V případě ztráty pracovního zdroje, rezervního zdroje a všech SZN dochází k SBO, tzv. stav úplné ztráty střídavého napájení. [12]



Obrázek 7: Dispoziční schéma SZN ETE [12]

Stav SBO je jeden z nejhorších scénářů, který z hlediska jaderné bezpečnosti může v jaderné elektrárně nastat. Hlavním impulsem k zabývání se řešením SBO v jaderné elektrárně byly události, které nastaly 11. března 2011 v jaderné elektrárně Fukushima Daiichi. Zemětřesení o magnitudě 9 vytvořilo dvě vlny tsunami [13]. Samotné zemětřesení JE nezpůsobilo vážné škody, ihned po zemětřesení došlo k automatickému odstavení reaktorů. Po výpadku napájení z ES došlo k automatickému spuštění 13 DG [13]. Ničivé byly vlny tsunami, které následovaly. První vlna tsunami dorazila k jaderné elektrárně 41 minut po zemětřesení, druhá následovala po 8 minutách [13]. Jejich výška přesáhla projektovou výšku o 5 m. Došlo k zaplavení prostorů v jaderné elektrárně, což způsobilo poškození čerpadel mořské vody v hlavním okruhu kondenzátoru, čerpadel chladících systémů určených pro odvod zbytkového tepla a zaplavení 12 z 13 DG. Nastal stav SBO. Po odstavení reaktoru bylo potřeba z aktivní zóny odvádět okolo 1,5 % nominálního výkonu. Bez vnějšího i vnitřního napájení byl odvod tepla v prvních hodinách řešen havarijním chlazením. V průběhu následujících dní došlo k explozím na třech blocích jaderné elektrárny Fukushima Daiichi a úniku radioaktivity do ovzduší [13]. Nehoda v jaderné elektrárně Fukushima Daiichi byla vyhodnocena podle IAEA na sedmý stupeň stupnice INES [14]. Zemětřesení o takové síle není v České republice moc pravděpodobné, ale po událostech z 24. června, kdy se na Břeclavsku přehnalo ničivé tornádo, by každý provozovatel jaderných elektráren měl být připraven na nejhorší možný scénář.

2.1.1 Schopnost startu malé vodní elektrárny Hněvkovice při blackoutu

Schopností „startu ze tmy“ se rozumí najetí bloku na jmenovité otáčky, dosažení jmenovitého napětí, připojení se k síti do ostrovního provozu bez podpory vnějšího zdroje napětí [15]. Vodní elektrárny jsou zdroje, které touto schopností disponují. V případě rozpadu ES je provozovatelem přenosové soustavy zpracován plán obnovy, ve kterém vodní elektrárny společně s přečerpávacími vodními elektrárnami tvoří základní zdroje obnovy. Jejich hlavní nevýhoda spočívá v omezené zásobě vody v nádržích, elektrickou energii do ES mohou dodávat pouze určitý čas.

EHN nedisponuje najížděcím zdrojem, který by zajistil uvedení elektrárny do chodu z úplného klidu. V roce 2015 byly na EHN provedeny investiční akce, které vedly k úpravě technologie EHN pro zprovoznění automatického startu generátoru „Start ze tmy“ a napájení vlastní spotřeby ETE po vyčleněné přenosové trase pro napájení chladicího čerpadla [4]. V tomtéž roce byla provedena úspěšná zkouška „startu ze tmy“ EHN. Jako najížděcí zdroj byl využit mobilní dieselgenerátor (dále také MDG) z ETE. Tento MDG je primárně určen pro potřeby ETE. Slouží jako alternativní zdroj při ztrátě všech zdrojů napájení elektrárny, především pro napájení zařízení systémů kontroly řízení kategorie ZN a pro napájení čerpadla k doplňování primárního okruhu. Proto je vysoce pravděpodobné, že při blackoutu nebude MDG možné použít pro napájení vlastní spotřeby EHN. [16]

Tabulka 7: Průběh zkoušky "Start ze tmy" EHN 10.04.2015 [4]

Čas	Akce
7:30	Příjezd kabelového vozu ETE na EHN
8:00	Zaparkování kabelového vozu na určené místo
8:03	Odjezd hasičů ETE pro MDG
8:30	Příjezd náhradní Vojenské centrály z Bechyně
8:45	Příjezd hasičů ETE s MDG
8:48	Začátek manipulace s kabelových vozem
9:00	Začátek manipulace s MDG
9:15	Vše připraveno, začátek připojování kabelů a MDG
9:50	MDG v provozu, v rozvaděči vlastní spotřeby kontrola sledu fází
10:03	MDG napájí rozvaděč vlastní spotřeby, na motoru provedena kontrolní zkouška sledu fází
10:05	Příprava na zkoušku roztočení TG1 a nabuzení na 6,3 kV
10:13	Najíždění TG1
10:14	Generátorový vypínač sepnut, začátek buzení
10:17	Napětí dosahuje 5kV, ověření měření
10:18	Napětí dosahuje 6 kV, ověření měření
10:20	Napětí dosahuje 6,3 kV, stabilizace pro potřeby ETE
10:30	TG1 odstaven konec zkoušky

2.2 Optimalizace najíždění malé vodní elektrárny Hněvkovice z beznapěťového stavu „Black start“

Ze skutečností popsaných v podkapitole 2.1.1 je patrné, že využívání MDG z ETE není nejoptimálnější variantou pro řešení stavu SBO v EHN. Proto bylo navrženo doplnit EHN vlastním najížděcím zdrojem. Optimalizace procesů spojených s najetím hydrogenerátoru ze tmy není potřebná, jelikož v roce 2015 došlo k úpravě technologie EHN (úpravě řídicích systémů, regulátoru turbíny, buzení, el. ochran) pro zprovoznění automatického startu generátoru. Jako najížděcí zdroj byl zvolen DG, který byl vybrán na základě technických, stavebních a ekonomických důvodů. Navíc najíždění EHN bylo pomocí MDG v minulosti již úspěšně odzkoušeno.

2.2.1 Návrh dieselgenerátoru pro malou vodní elektrárnu Hněvkovice

Návrh DG byl proveden pomocí software SpecSizer, poskytovaný společností Caterpillar [17]. SpecSizer je nástroj sloužící k výběru nejvýhodnější varianty DG pro dané zadání. Ze zadaných parametrů, sekvencí připínání jednotlivých spotřebičů o určitém příkonu a charakteru zátěže, dochází k výběru doporučené výkonové řady DG. Databáze SpecSizer nabízí širokou škálu DG od výkonu 9,5 kVA do 3 500 kVA. Pro vhodný výběr DG bylo nutné v programu definovat základní parametry:

- **Atmosférické podmínky v místě instalace DG**
 - **Maximální teplota okolí**
 - **Nadmořská výška**
 - **Vlhkost vzduchu**
- **Volba motoru**
 - **Provozní režim** — provozní režim se volí za účelem výběru ideálního DG pro dané řešení, jak z hlediska výkonové řady, tak ceny. Špatně zvolený provozní režim by vedl k výkonovému předimenzování DG a tím ke zvýšení ceny. Naopak poddimenzování by vedlo ke snížení životnosti DG. SpecSizer rozlišuje tři provozní režimy:
 - **Trvalý výkon** — se využívá v aplikacích, ve kterých je potřeba dodávat stálý výkon po neomezený počet hodin v roce, je tzv. určen pro dlouhodobý provoz při zatížení 70—100 % jmenovitého výkonu. [18]
 - **Prime režim** — se využívá v aplikacích s proměnnou zátěží. Prime režim dovoluje krátkodobé přetížení DG v maximální výši 10 % po

dobu jedné hodiny. Je však požadován časový rozestup mezi dvěma přetíženími 12 h. Průměrný faktor zatížení DG v režimu Prime by neměl přesáhnout 70 %. [18]

- **Standby režim** — se využívá v případě zajištění nouzového napájení při jmenovitém výkonu po dobu trvání výpadku. Průměrný faktor zatížení DG v režimu Standby by neměl přesáhnout 70 %. Provoz DG ve Standby režimu může být maximálně 500 h za rok. [18]
- **Používané palivo** — mimo diesellové varianty lze volit z agregátu na zemní plyn nebo LPG. U těchto paliv je maximální distribuovaný výkon 150 kW.
- **Emisní certifikáty**
- **Výkonová rezerva** — pro navrhovaný DG byla zvolena výkonová rezerva 20 %. Z důvodu nezahrnutí spotřeby provozního objektu EHN.
- **Volba elektrických parametrů generátoru**
 - **Elektrický systém** — lze volit z trojfázového, nebo jednofázového systému.
 - **Výstupní napětí generátoru** — je možno vybírat z generátoru o výstupním napětí od 200/115 V až po 11 000/6 351 V.
 - **Výstupní frekvence**
- **Metoda dimenzování DG**
 - **Konvenční metoda** — umožňuje uživateli definovat maximální hodnotu poklesu napětí a frekvence od 5 % do 35 %. Ze specifikací instalace bude vybrán takový DG, u kterého nedojde při připínání jednotlivých kroků zatížení k poklesu napětí a frekvence pod definovanou mez. [19]
 - **Frekvenční metoda** — vychází z mezinárodního standardu ISO 8528, který definuje maximální přípustné hodnoty poklesu napětí a frekvence.[19]

Po zadání základních parametrů bylo nezbytné definovat jednotlivé spotřebiče napájené navrhovaným DG a jejich sekvenci spouštění. SpicSizer nabízí celkem 16 druhů spotřebičů od transformátoru, čerpadel, kompresorů až po světelnou techniku.

Pro návrh DG bylo potřebné vytvořit model vlastní spotřeby EHN a definovat sekvenci kroků spouštění jednotlivých technologií pro najíždění hydrogenerátoru EHN. Model byl vytvořen pro najetí jednoho hydrogenerátoru.

2.2.1.1 Model vlastní spotřeby malé vodní elektrárny Hněvkovice

Spotřebiče vlastní spotřeby jsou elektrické zařízení, která svou funkcí zabezpečují spolehlivý a bezpečný provoz elektrárny. V případě VE je velikost vlastní spotřeby přibližně 1 % instalovaného výkonu[20]. Největším spotřebičem vlastní spotřeby EHN je elektromotor čerpacího soustrojí čerpacího agregátu rychlouzávěru o výkonu 15 kW. Čerpací soustrojí je zdrojem tlakové energie pro ovládání rychlouzávěru. Dalšími významnými spotřebiči jsou dva elektromotory čerpadlových soustrojí čerpacího agregátu regulátoru, každý o výkonu 11 kW. K provozu se využívá vždy jeden elektromotor, druhý se nachází v záložním režimu. Čerpací agregát regulátoru dodává tlakový olej pro systém regulace rozváděcího kola, pro systém regulace oběžného kola a pro ostatní hydraulické pohony na turbíně. V čerpacím agregátu regulátoru je akumulováno dostatečné množství tlakového oleje pro nouzové odstavení turbíny během výpadku napájecího napětí pohonu čerpacího agregátu regulátoru. Čerpací agregát regulátoru mimo čerpací soustrojí obsahuje větrník o objemu 0,125 m³. Větrník slouží jako zdroj tlakového oleje pro regulaci turbíny. K doplnění vzduchu ve větrníku dochází pomocí vnější vysokotlaké kompresorové jednotky s elektromotorem o výkonu 4 kW. Čerpací agregát je dále opatřen filtrační jednotkou pro odstranění mechanických nečistot z regulačního oleje. Filtrační jednotka je vybavena vlastním oběhovým čerpadlem s elektromotorem o výkonu 0,75 kW. Systém chladicí vody je složen ze dvou čerpacích soustrojí poháněných dvěma elektromotory, každý o výkonu 5,5 kW, hrubým filtrem, samočisticím filtrem a potrubním systémem. Systém chladicí vody dodává vodu pro chlazení vzduchu v systému chlazení generátoru, oleje ložisek a regulačního oleje v nádrži čerpacího agregátu regulátoru, dále se chladicí voda využívá pro mazání a chlazení kluzných segmentů ložiska a šňůrových ucpávek hřídele turbíny. K chlazení se využívá voda z přehrady. Hydrostatické mazání závěsného ložiska slouží pro usnadnění rozběhu a doběhu soustrojí. Systém se skládá z vysokotlakého zubového čerpadla poháněného elektromotorem o výkonu 3 kW a potrubního systému. EHN disponuje také systémem stlačeného vzduchu, složeného z kompresorové stanice a vzdušníku o objemu 4 m³. O výrobu stlačeného vzduchu se starají dva pístové kompresory, každý poháněný elektromotorem o výkonu 5,5 kW. Systém stlačeného vzduchu slouží k akumulaci stlačeného vzduchu a jeho dodávce pro zpětný proplach samočisticího filtru chladicí vody, lze ho využít pro naplnění větrníku čerpacího agregátu regulátoru a jako pracovní vzduch. Následujícími spotřebiči vlastní spotřeby jsou dva elektromotory čerpadel prosáklé vody turbíny o výkonu 0,25 kW, dva elektromotory čerpadel prosáklého oleje turbíny o výkonu 1,1 kW, dva elektromotory čerpadlových soustrojí prosáklé vody elektrárny o výkonu 2,2 kW a elektromotor kompresorové stanice mechanických brzd. Všechny pohony jsou spouštěny přímým připojením na napájecí síť. Napájení všech pohonů pro přímý provoz daného soustrojí zajišťuje strojový rozvaděč 0,4 kV. Spotřebu elektrických zařízení

napájených ze stejnosměrných rozvodů nebylo možné z dostupných podkladů určit. Pro účely této práce bude počítáno s maximálním možným odběrem ze stejnosměrného rozvaděče daným výkonem usměrňovače, tedy 10,3 kVA. Usměrňovač je napájen z hlavního rozvaděče 0,4 kV. Z hlavního rozvaděče jsou také napájena topná tělesa generátoru o celkovém výkonu 4 kW. Počet a výkon světelných zařízení byl odhadnut na 40 světelných trubíc o příkonu 36 W. V modelu vlastní spotřeby EHN nejsou zahrnuty elektrické spotřebiče provozního objektu, elektrická zařízení čisticího stroje česlí a pohony aeračních výpustí. [4]

Tabulka 8: Přehled spotřebičů vlastní spotřeby technologie jednoho hydrogenerátoru

Spotřebič	Počet	Char. zátěže	Soudobost	Jmenovité napětí	Jmenovitý výkon	Popis
AM ¹⁾	1	Čerpadlo	1	400 V	15 kW	Pohon čerpacího soustrojí čerpacího agregátu rychlouzávěru
AM	2	Čerpadlo	0,5	400 V	11 kW	Pohon čerpacího soustrojí čerpacího agregátu regulátoru
AM	2	Čerpadlo	0,5	400 V	5,5 kW	Pohon čerpacího soustrojí chladicího systému
AM	2	Kompresor	0,5	400 V	5,5 kW	Pohon pístového kompresoru systému stlačeného vzduchu
AM	1	Kompresor	1	400 V	4 kW	Pohon kompresoru čerpacího soustrojí agregátu regulátoru
AM	1	Čerpadlo	1	400 V	3 kW	Pohon vysokotlakového zubového čerpadla hydrostatického mazání závěsného ložiska
AM	2	Čerpadlo	0,75	400 V	1,1 kW	Pohon hydraulického čerpadla čerpadlového systému prosáklého oleje turbíny
AM	2	Čerpadlo	1	400 V	0,75 kW	Pohon čerpadla filtrační jednotky čerpacího agregátu regulátoru
AM	2	Čerpadlo	0,75	400 V	0,25 kW	Pohon čerpadla čerpacího systému prosáklé vody turbíny
US ²⁾	2		0,5	400 V	10,3 kVA	Zdroj stejnosměrného napětí pro hlavní stejnosměrný rozvaděč
Topná tělesa	4		1	230 V	4 kW	Vytápění generátoru na požadovanou hodnotu
Osvětlení	40		1	230 V	1,44 kW	—

¹⁾AM — asynchronní motor

²⁾US — usměrňovač

2.2.1.2 Sekvence kroků během najíždění hydrogenerátoru

Návrh sekvence kroků při najíždění hydrogenerátoru byl proveden podle současného řešení spouštění hydrogenerátoru. Aby nedošlo k bezdůvodnému předimenzování navrhovaného DG, byly některé kroky rozděleny. Dimenzování DG nejvíce ovlivňují kroky, ve kterých dochází ke spouštění velkých elektromotorů. V EHN jsou všechny motory spouštěny přímým připojením na napájecí síť. Při tomto druhu spouštění dochází k vysokým hodnotám záběrných proudů, které mají za následek pokles napětí na přípojnicích zařízení. Pokles napětí na přípojnicích zařízení by podle ČSN 38 1120 neměl klesnout pod 85 % [21]. Proto se musí zvolit taková výkonová řada DG, u které nedojde v žádném kroku k poklesu napětí pod definovanou hodnotu.

Základní předpoklady pro návrh sekvence kroků během najíždění hydrogenerátoru jsou:

- rychlouzávěr je v poloze uzavřen, tlak ovládacího oleje v čerpacím agregátu rychlouzávěru je pod požadovanou hodnotou,
- tlak oleje v čerpacím agregátu regulátoru se nachází pod požadovanou hodnotou, tlak vzduchu ve větrníku čerpacího agregátu regulátoru je pod požadovanou hodnotou,
- stav hladiny prosáklého oleje v nádrži prosáklého oleje turbíny dosahuje úrovně „Zvýšená 2“ (zapínání záložního čerpacího soustrojí),
- stav prosáklé vody ve víku turbíny dosahuje úrovně „Zvýšená 2“ (zapínání záložního čerpacího soustrojí),
- teplota vinutí hydrogenerátoru poklesla pod hodnotu 15 °C,
- maximální zatížení usměrňovače.

Vstupní předpoklady byly navrženy pro nejhorší možný scénář. Předpokládají ztrátu pracovního i záložního zdroje vlastní spotřeby po delší časové období. K napájení zabezpečovacích zařízení, telekomunikačních zařízení, zařízení pro zpracování dat, nouzového osvětlení a řídicího systému slouží staniční baterie.

V prvním kroku se předpokládá napájení:

- stejnosměrného obvodu pomocí usměrňovače (reprezentuje spotřebu automatik soustrojí a společných zařízení, akčních členů automatik soustrojí a společných zařízení, provozní signalizaci, nouzové osvětlení a spotřebu velínu),
- světelných okruhů,
- topných těles generátoru.

V druhém kroku se předpokládá spuštění:

- primárního pohonu čerpacího soustrojí systému prosáklého oleje turbíny,
- pomocného pohonu čerpacího soustrojí systému prosáklého oleje turbíny,
- primárního pohonu čerpacího soustrojí systému prosáklé vody turbíny,

- pomocného pohonu čerpacího soustrojí systému prosáklé vody turbíny.

Ve třetím kroku se předpokládá spuštění:

- pohonu čerpacího soustrojí čerpacího agregátu rychlouzávěru.

Ve čtvrtém kroku se předpokládá spuštění:

- pohonu čerpacího soustrojí čerpacího soustrojí agregátu regulátoru,
- pohonu čerpadla filtrační jednotky čerpacího agregátu regulátoru.

V pátém kroku se předpokládá spuštění:

- pohonu kompresoru čerpacího soustrojí agregátu regulátoru,
- pohonu čerpacího soustrojí systému chladicí vody.

V šestém kroku se předpokládá spuštění:

- pohonu vysokotlakového zubového čerpadla hydrostatického mazání závěsného ložiska.

2.2.1.3 Výstup z programu SpecSizer

Programem SpecSizer byl vyhodnocen jako neoptimálnější DG pro najetí EHN DG DE165E3 o instalovaném výkonu 165 kVA. Report ze SpecSizer se nachází v **Příloze C**. Maximální zatížení DG by nastalo ve třetím kroku najíždění, ve kterém dochází ke spouštění pohonu čerpacího agregátu rychlouzávěru o výkonu 15 kW. Maximální zatížení DG by činilo v tomto kroku 163 kVA. V tomto kroku by docházelo i k maximálnímu poklesu napětí 11,1 %. V ostatních krocích by pokles nedosahoval 10 %. Konečné zatížení DG po spuštění celé technologie by činilo 76,6 kVA, což by představovalo využití kapacity DG ze 47 %.

Výsledný návrh výkonové řady DG nejvíce ovlivňuje spouštění elektromotorů přímým připojením na napájecí síť. Byly proto vytvořeny dva scénáře, ve kterých dochází ke spouštění elektromotorů s výkonem vyšším než 1,1 kW moderními způsoby. V prvním scénáři byly elektromotory spouštěny pomocí softstartérů. Záběrné proudy byly omezeny na 200 % jmenovitého proudu elektromotoru. Tato hodnota představuje dostatečně velký záběrný moment pro roztočení pohonu čerpacího soustrojí. V tomto scénáři byl programem SpecSizerem vyhodnocen jako neoptimálnější DG DE110E3 o výkonu 110 kVA. Kapacita DG by byla využita z 69 %. Ve druhém scénáři byly všechny motory s výkonem vyšším než 1,1 kW spouštěny pomocí měničů frekvence. SpecSizerem byl vyhodnocen pro tento scénář neoptimálnější taktéž DG DE110E3 o výkonu 110 kVA.

Pakliže by došlo k realizaci návrhu najížděcího DG, měla by být zvážena investice do změny způsobu spouštění elektromotorů EHN. Při současné technologii by došlo k nadbytečnému předimenzování DG.

2.2.1.4 Dieselgenerátor DE165E3

DE165E3 je osazený čtyřdobým, šestiválcovým v řadě uspořádaným naftovým motorem C7.1 o objemu 7 l. Motor je chlazený vodou pomocí axiálního chladiče. Jako generátor slouží alternátor R2453L4. Generátor a motor jsou spojeny pevnou spojkou. Kmitočet elektrické energie generátoru je přímo závislý na otáčkách motoru. DE165E3 lze opatřit automatikou pro okamžité najetí DG při ztrátě napětí tzv. ATS (Automatic transfer switch). Jelikož DG je navrhován primárně pro najetí technologie elektrárny, není nutné DG o modul ATS doplňovat. Pro přímé zásobování motoru naftou slouží nádrž o objemu 349 l, umístěná pod DG. Objem nádrže by měl vystačit na 8 h nepřetržitého provozu DG při plném zatížení. DG lze doplnit o kapotu CAE. Kapota umožňuje umístění do venkovních prostorů.



Obrázek 8: DE165E3 nekapotovaná verze [22]

2.2.1.5 Umístění dieselgenerátoru v prostorách malé vodní elektrárny Hněvkovice

Pro instalaci DG v EHN připadají v úvahu dvě lokality. V případě nekapotované verze, pak instalace přímo v objektu elektrárny. Prostory rozveden a dozorny disponují dostatečným prostorem pro jeho instalaci. Pro připojení DG do rozvaděče vlastní spotřeby 0,4 kV by nebylo potřeba větších stavebních úprav. K vedení kabeláže by se využilo současných kabelových lávek

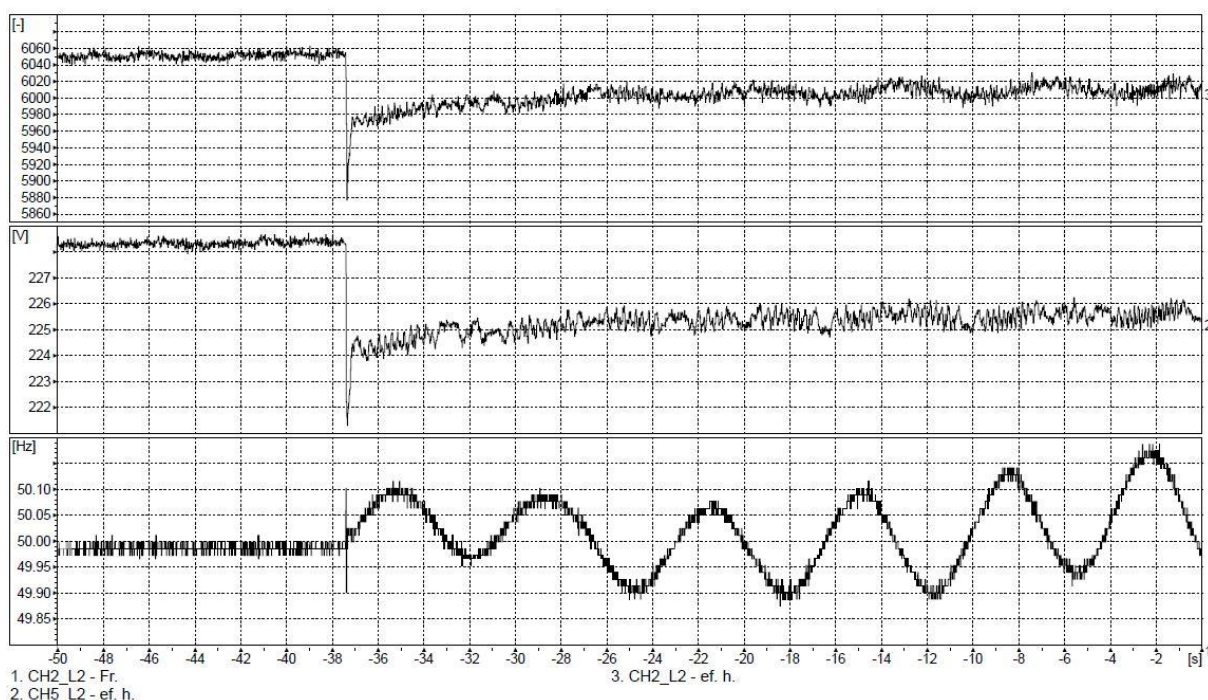
umístěných v prvním suterénu objektu elektrárny. Nutné by bylo vyřešit odvod výfukových plynů, které během provozu DG vznikají. EHN nedisponuje žádným odvětrávacím systémem, pomocí kterého by se výfukové plyny odváděly. Proto v případě instalace DG v prostorách rozveden a dozorny, by muselo dojít k jeho instalaci. Z důvodu eliminace úniku provozních kapalin by měl být DG doplněn o retenční nádrž, nebo napojen do odvodňovacích kanálek, které jsou sváděny do nádrží systému prosáklých vod elektrárny. V případě napojení na systém prosáklých vod elektrárny by měla být ověřena kapacita čištění prosáklých vod.

Druhou možností by bylo umístění DG na nádvoří elektrárny. DE165E3 by se opatřil kapotou CAE. V této variantě by nemusel být řešen odvod výfukových plynů. Také by došlo ke snížení hluku z provozu DG. Při 100 % zatížení je udávaná hladina hluku 65 dB. Oproti tomu by se zkomplikovalo připojení DG do rozvaděče vlastní spotřeby 0,4 kV.

KAPITOLA 3: SEPARÁTNÍ PROVOZ ČERPAČÍ STANICE HNĚVKOVICE A MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY HNĚVKOVICE

V roce 2016 byla ověřena schopnost provozu ČSH v separátním provozu s EHN. Po spuštění asynchronního motoru hlavního čerpadla ČSH pomocí vedení 110 kV byl výkon hydrogenerátoru EHN zregulován na výkon asynchronního motoru. Poté došlo k vypnutí napájení z vedení 110 kV. Po odeznění přechodového děje byl separátní provoz stabilní a provozuschopný. Jelikož se tato DP zabývá využitím EHN pro dodávku surové vody do ETE během SBO, je předpokládáno, že spuštění asynchronního motoru hlavního čerpadla nebude provedeno pomocí vedení 110 kV. Hydrogenerátor EHN disponuje dostatečným výkonem pro napájení motoru hlavních čerpadel, ale není schopen zajistit jeho najetí. Hydrogenerátor by byl odstaven svými ochranami viz podkapitola 3.2. Z tohoto důvodu je spouštění asynchronního motoru hlavních čerpadel ČSH pomocí EHN primárním problémem.

Pokus č.4 - R6kV vypnutí přívodu z 110kV

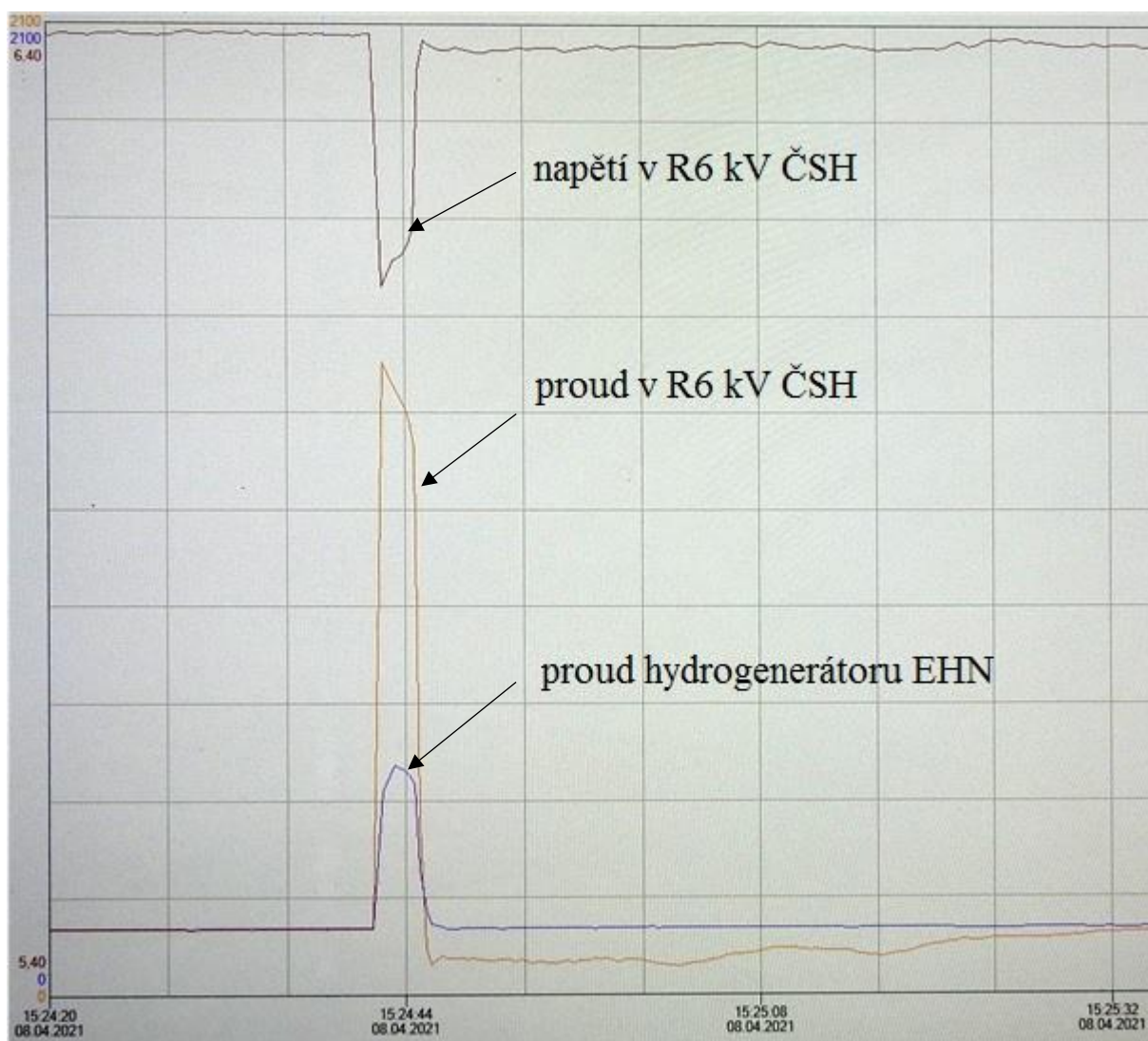


Obrázek 9: Průběh napětí a frekvence v R6kV při přechodu ČSH na separátní provoz s EHN [4]

3.1 Současné řešení spouštění asynchronního motoru hlavních čerpadel čerpačích stanic Hněvkovice

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 1.2.2 spouštění motoru hlavních čerpadel je provedeno přímým připojením na napájecí síť. Tento způsob rozběhu se využívá především u motorů nižších výkonů (jednotky kW). U motorů velkých výkonů (stovky kW až jednotky MW) se ke spouštění přímým připojením na síť přistupuje v případech, ve kterých je motor připojen do rozvodny s dostatečným zkratovým výkonem. Svým rozběhem nesmí vyvolat takový pokles napětí, který by

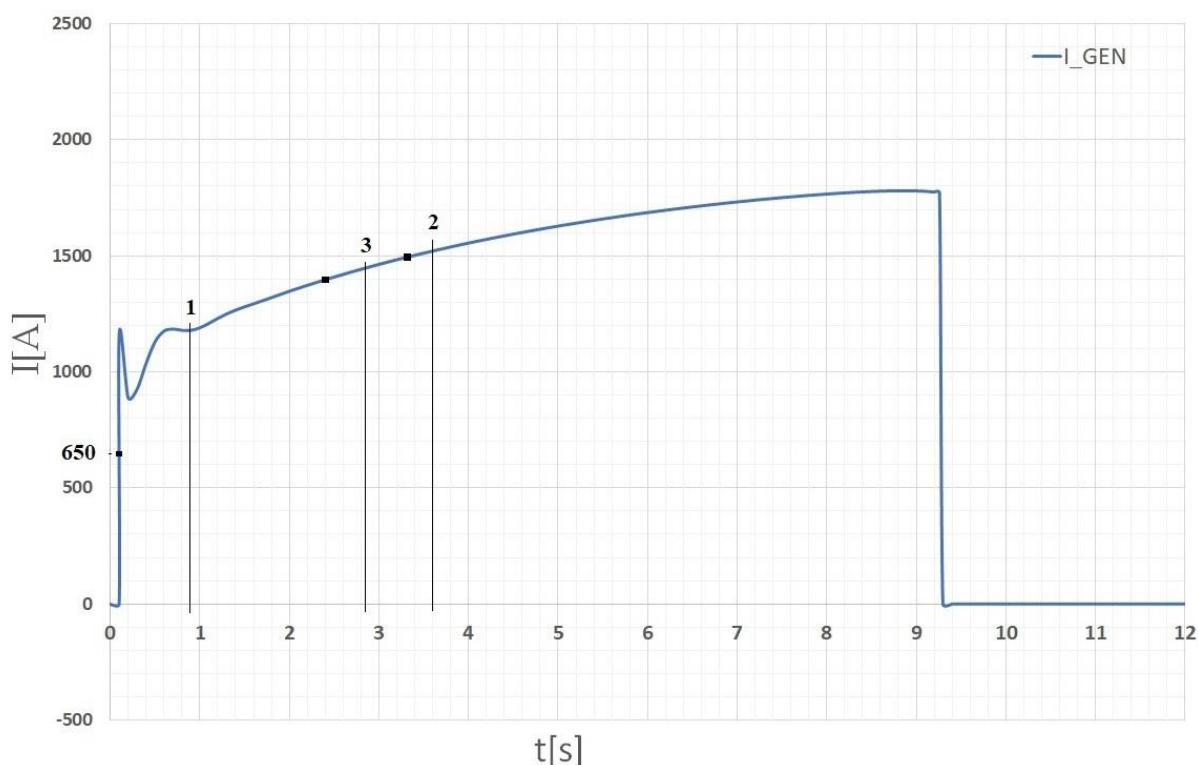
ovlivnil kvalitu napětí v distribuční soustavě (dále také DS) [23]. ČSH je separovaná od DS, je přímo připojena na 110 kV TR Kočín, která disponuje dostatečným zkratovým výkonem. I přes tuto skutečnost během spuštění motoru dochází k poklesu napětí, viz **Obrázek 10**. Na obrázku jsou znázorněné průběhy napětí v R6 kV, proudu motoru hlavního čerpadla a proudu hydrogenerátoru EHN v závislosti na čase. Pokles napětí u zaznamenaného spouštění činil přibližně 250 V, což představuje 4% pokles napětí od nominální hodnoty. Pokles napětí během rozběhu má za následek kvadratický pokles hnacího momentu. I přes tento pokles jsou hodnoty krouticího momentu natolik vysoké, že dochází k namáhání mechanických součástí [24]. Záběrný proud motoru dosáhl hodnoty 1470 A. Z obrázku je patrné, že spouštění motoru ovlivňuje generátor EHN. Proud generátoru vzrostl přibližně o 135 A.



Obrázek 10: Průběh napětí v R6kV ČSH, proudu v R6kV a proudu hydrogenerátoru EHN při rozběhu motoru hlavního čerpadla z distribuční soustavy [9]

3.2 Simulace spouštění přímým připojením na síť asynchronního motoru hlavního čerpadla v separátním provozu s hydrogenerátorem malé vodní elektrárny Hněvkovice

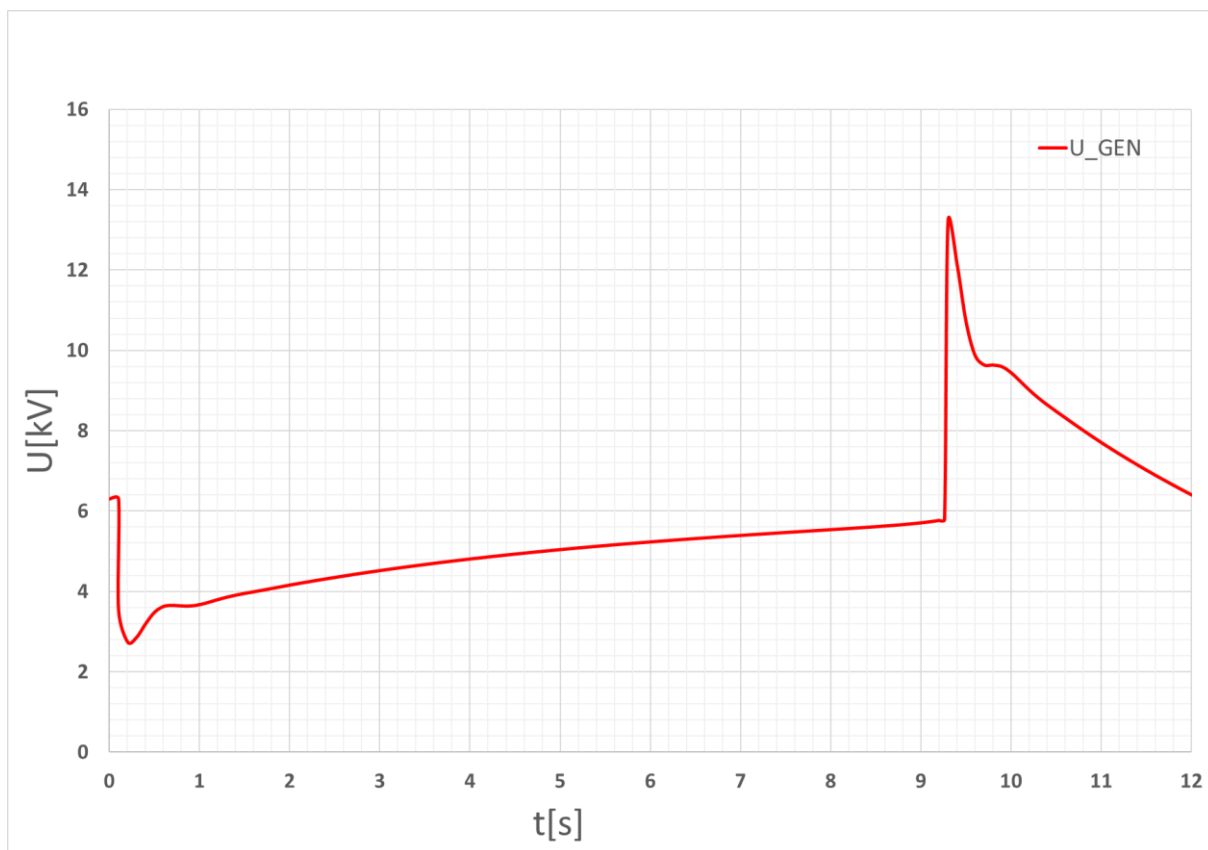
Simulace spouštění byla provedena pomocí programu MODES, který slouží k analýze dynamického chování definované elektrizační soustavy [25]. Ze simulace vyplývá, že hydrogenerátor EHN není schopen rozběhnout asynchronní motor, aniž by nebyl odstaven svými ochranami. Na **Obrázku 11** je znázorněn průběh proudu hydrogenerátoru během spouštění motoru hlavních čerpadel, s vyznačenými body působení jednotlivých stupňů nadproudových generátorových ochran. V bodě „1“ by byl hydrogenerátor odstaven I. stupněm nadproudové generátorové ochrany přibližně v čase 0,9 s od spouštění (přetížení). Pokud by I. stupeň nezapůsobil, hydrogenerátor by byl odstaven nadproudovou ochranou chránící kabelový vývod z R6 kV do ČSH v čase 2,85 s od spuštění, na obrázku vyznačený bodem „3“. Pokud by nezapůsobila ani tato ochrana, hydrogenerátor by byl odstaven II. stupněm (záložní) nadproudové generátorové ochrany v čase 3,6 s od spouštění, na obrázku vyznačený bodem „2“.



Obrázek 11: Průběh proudu generátoru EHN při simulaci spouštění motoru hlavních čerpadel

Z hlediska napěťových poměrů by při spouštění v separátním provozu docházelo ke značnému podpětí (viz **Obrázek 12**), které by sice samotnému hydrogenerátoru nezpůsobilo žádné škody, ale mělo by nepříznivý vliv na ostatní elektrická zařízení. Pokles napětí u asynchronních motorů znamená kvadratický pokles jejich momentu. Mohlo by dojít až k takovému poklesu momentu, který by znamenal jejich zastavení, a tím by došlo k tepelnému

přetěžování [26]. Na **Obrázku 12** je znázorněno i odpojení asynchronního motoru hlavních čerpadel v 9,1 s od spouštění. Tímto odlehčením hydrogenerátoru by vzniklo přepětí o maximální hodnotě 13,2 kV. Takové přepětí by mohlo mít za následek proražení mezizávitové izolace hydrogenerátoru. Hydrogenerátor by byl okamžitě odstaven II. stupněm hlavní napěťové generátorové ochrany při napětí 7,8 kV.



Obrázek 12: Průběh napětí generátoru EHN při simulaci spouštění motoru hlavních čerpadel

3.3 Snížení záběrných proudů asynchronního motoru hlavních čerpadel

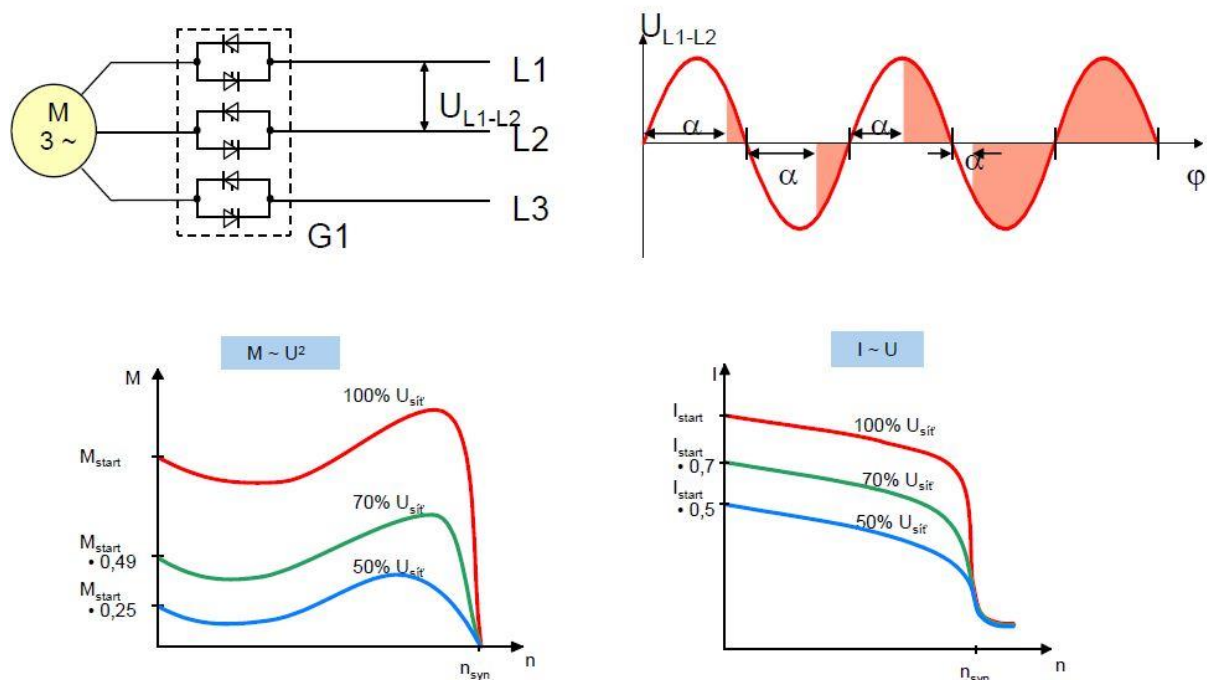
Při výběru metody spuštění asynchronních motoru je důležité zvážit několik důvodů:

- napěťové poměry při spouštění,
- momentovou charakteristiku zátěže (druh zátěže),
- moment asynchronního motoru,
- mechanické namáhání,
- regulace otáček,
- spolehlivost,
- náročnost na obsluhu,
- cenu a ekonomiku provozu.

Pro omezení záběrných proudů asynchronního motoru hlavního čerpadla jsou k dispozici jak standardní řešení (spouštěcí tlumivka, autotransformátor), tak moderní způsoby využívající elektronického spouštěcího zařízení (softstartér, měnič frekvence). Z výše uvedených způsobů budou pro snížení záběrných proudů analyzována zařízení vysokonapěťový softstartér a vysokonapěťový měnič frekvence.

3.3.1 Vysokonapěťový softstartér

Jednou z možností, jak omezit záběrné proudy asynchronního motoru hlavních čerpadel, je použití softstartéru. Softstartér je elektrické zařízení, které je určeno ke spouštění a doběhu asynchronních motorů. Skládá se ze dvou antiparalelně řazených výkonových tyristorů nainstalovaných na jednotlivých fázích. Výkonové tyristory jsou ovládány řídicí deskou. Princip řízení asynchronního motoru softstartérem spočívá v řízení efektivní hodnoty napětí na vstupu motoru. Jedná se tedy o napěťovou regulaci. Při tomto typu regulace dochází k přibližně lineárnímu poklesu záběrného proudu s napětím, naopak záběrný moment klesá kvadraticky. V případě těžkých rozběhů, např. drtiče nebo naloženého dopravníku by mohla nastat situace, ve které záběrný moment bude menší než moment zátěže, v tomto případě by se pohon nerozběhl [27]. Z tohoto důvodu je použití softstartéru omezené. Benefity sníženého krouticího momentu jsou pozvolný rozběh a nižší míra opotřebení mechanických částí [28].



Obrázek 13: Závislosti záběrného proudu a momentu na otáčkách asynchronního motoru při daném napětí sítě [28]

Softstartéry jsou vybaveny několika metodami k rozběhu, ale i doběhu motoru. Proto mohou být přizpůsobeny tak, aby vyhovovaly potřebám dané aplikace.

- Řízení momentu — pomocí hodnot točivého momentu a času (rozběhová charakteristika) zadaných uživatelem. Softstartér provede rozběh podle zadaných hodnot. [29]
- Proudová rampa („Kick start“) — se využije v aplikacích, ve kterých je při rozběhu potřeba překonat velký počáteční moment zátěže. Na motor je na okamžik přiloženo jmenovité napětí, motor vyvine maximální záběrný moment, po časovém zpoždění se napětí sníží na takovou hodnotu, aby odebíraný proud klesl na zadanou hodnotu.
- Konstantní proud — umožňuje rozběh motoru při konstantním záběrném proudu, který lze nastavit od (100 %—600 %) jmenovité hodnoty proudu.
- Doběhová rampa — softstartér postupně snižuje výstupní napětí po zadané napěťové nebo momentové charakteristice. Tato metoda se používá především v aplikacích s čerpadly a dopravníkovými pásy. U čerpadel dochází k eliminaci vodních rázů, které způsobují namáhání potrubního systému. [29]

3.3.1.1 Ověření spouštění asynchronního motoru hlavního čerpadla pomocí vysokonapěťového softstartéru

K ověření rozběhu asynchronního motoru hlavního čerpadla pomocí hydrogenerátoru bude použita metoda rozběhu softstartérem „konstantním proudem“. Aby byl hydrogenerátor schopen rozběhnout motor v separátním provozu, nesmí záběrný proud, odebíraný proud vlastní spotřeby EHN a ČSH překročit hodnotu 650 A. Při překročení této hodnoty, by došlo k vybavení nadproudové ochrany a k odstavení hydrogenerátoru. V analýze bude motor spouštěn při jmenovitém proudu hydrogenerátoru 495 A.

Tabulka 9: Parametry asynchronního motoru hlavních čerpadel pro výpočet momentové charakteristiky [9]

Napětí nakrátko	U_k	1250	V
Proud nakrátko	I_k	350	A
Ztráty nakrátko	P_k	107,1	kW
Odpor vinutí statoru při 20 °C	R_{S20}	0,0649	Ω
Počet pólových dvojic	p	4	—
Provozní teplota	ϑ	40	°C

- Výpočet statorového odporu při provozní teplotě:

$$R_s = \frac{234,5 + \vartheta}{234,5 + \vartheta_{20}} \cdot R_{S20} = \frac{234,5 + 40}{234,5 + 20} \cdot 0,0649 = 0,07 \Omega \quad (3-1)$$

- Výpočet rotorového odporu přepočteného na satorové vinutí:

$$R'_r = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2} - R_s = \frac{107,1 \cdot 10^3}{3 \cdot 350^2} - 0,07 = 0,22 \Omega \quad (3-2)$$

- Výpočet reaktance satorového vinutí:

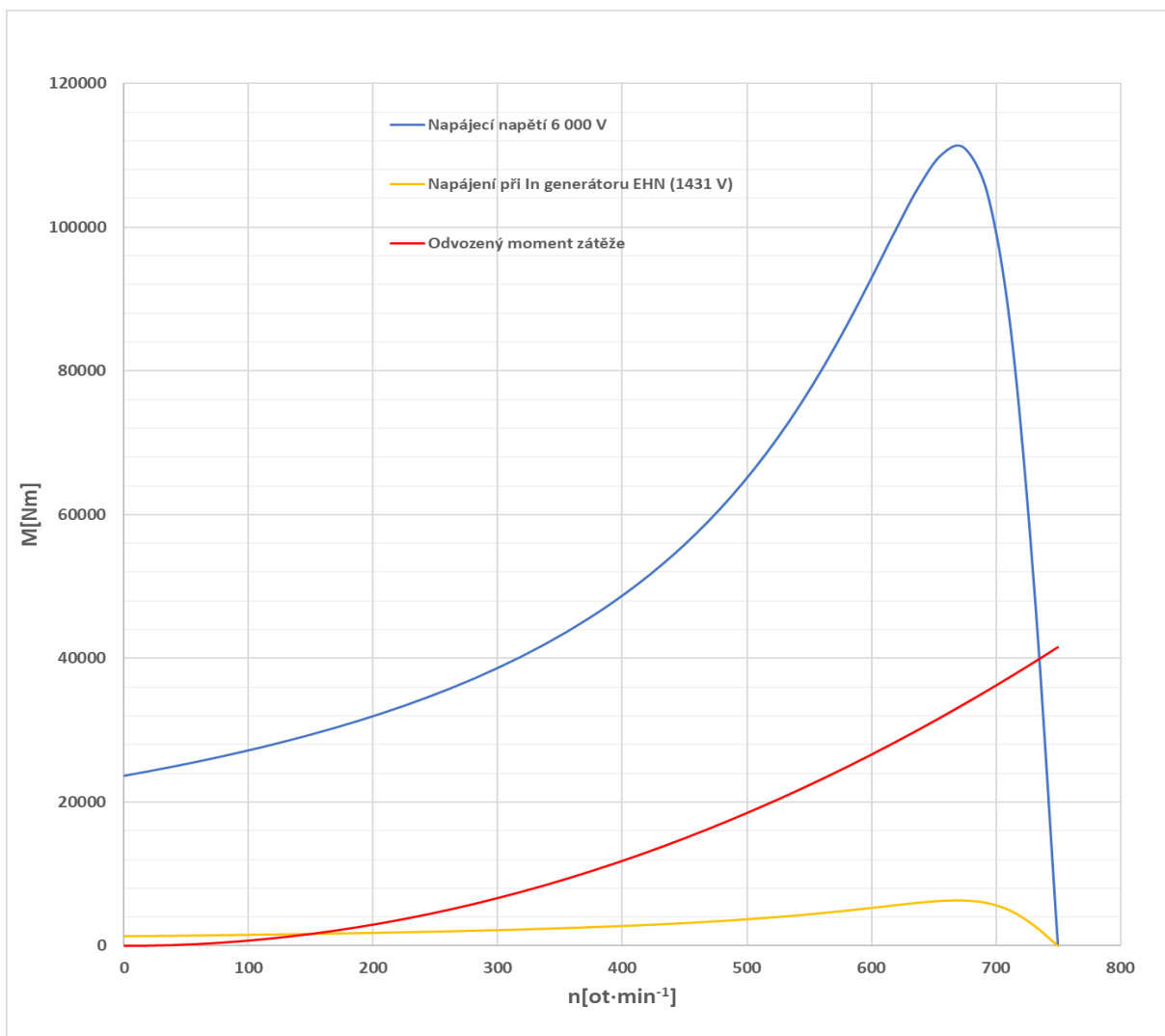
$$X_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3 \cdot U_k^2 \cdot I_k^2 - P_k^2}}{3 \cdot I_k^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3 \cdot 1250^2 \cdot 350^2 - (107,1 \cdot 10^3)^2}}{3 \cdot 350^2} = 1,02 \Omega \quad (3-3)$$

- Pro výpočty bude uvažováno, že hodnota přepočtené reaktance rotoru na satorové vinutí je rovna reaktanci satorového vinutí:

$$X'_r \cong X_s \quad (3-4)$$

- Rovnice pro výpočet momentu asynchronního motoru:

$$M = \frac{R'_r}{s \cdot \Omega_{SM}} \cdot \frac{U^2}{(X_s + X'_r)^2 + \left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2} = \frac{R'_r}{s \cdot \frac{\Omega_s}{p}} \cdot \frac{U^2}{(X_s + X'_r)^2 + \left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2} \quad (3-5)$$



Obrázek 14: Momentové charakteristika asynchronního motoru hlavních čerpadel při jmenovitém napájení a při napájecím napětí odpovídající satorovému proudu I_{NG} hydrogenerátoru EHN

3.3.1.2 Hodnocení vysokonapětového softstartéru pro spuštění asynchronního motoru hlavních čerpadel v separátním provozu s hydrogenerátorem malé vodní elektrárny Hněvkovice

Vysokonapětový softstartér svou metodou rozběhu „konstantním proudem“ umožňuje omezit záběrné proudy motoru na hodnoty, které by nezpůsobily odstavení hydrogenerátoru. Jelikož je využito napětěvé regulace, dochází při omezení záběrného proudu ke kvadratickému poklesu záběrného momentu. Na **Obrázku 14** jsou znázorněny momentové charakteristiky asynchronního motoru hlavních čerpadel a momentová charakteristika čerpadla. Momentová charakteristika čerpadla byla odvozena od jmenovitého momentu motoru, protože hodnoty pro její sestavení nebyly k dispozici. Z vynesných závislostí vyplývá, že spuštění motoru pomocí vysokonapětového softstartéru při jmenovitém proudu hydrogenerátoru není uskutečnitelné z důvodu malého záběrného momentu.

3.3.2 Vysokonapětový měnič frekvence

Měnič frekvence se nejčastěji využívá v aplikacích, ve kterých je potřeba řídit otáčky motoru pro regulaci dodávaného množství média. Pro své schopnosti dosahovat vysokých hodnot záběrných momentů, už od nulových otáček, a nízkých záběrných proudů se hojně využívá i pro pouhé spouštění motorů tzv. soft start [24].

Rozlišují se dva typy měničů frekvence:

- Přímé měniče frekvence, u kterých dochází pouze k jedné transformaci energie. Vstupní střídavé napětí o konstantní efektivní hodnotě a konstantní frekvenci se přímo mění na výstupní střídavé napětí o proměnné efektivní hodnotě a proměnné frekvenci. [30]
- Nepřímé měniče frekvence, u kterých je nejprve vstupní napětí/proud pevné frekvence pomocí usměrňovače transformováno na stejnosměrné napětí/proud, následně střídačem transformováno na střídavé napětí/proud proměnné frekvence. [30]

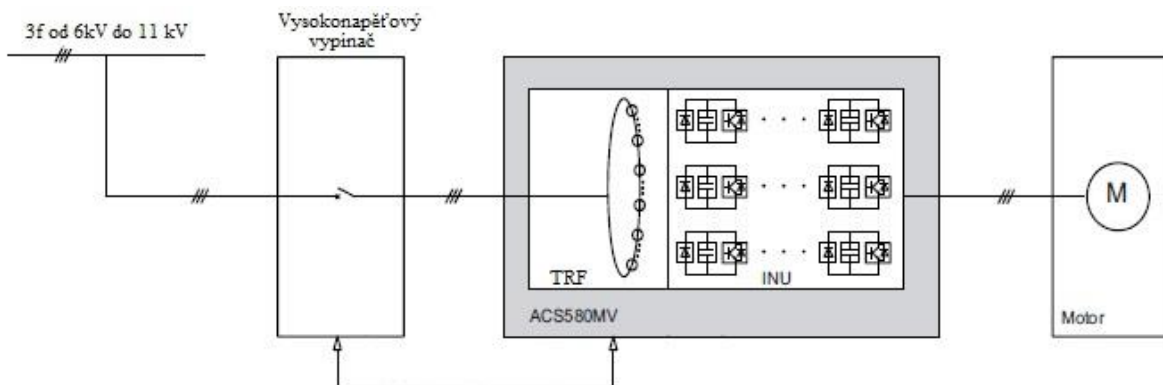
Nejběžnějším typem přímého měniče frekvence je tzv. cyklokonvertor, který je realizován třemi reverzačními tyristorovými usměrňovači s fázovým řízením. Nejčastější použití cyklokonvertorů je u důlních pomaluběžných pohonů velkých výkonů. [30]

Nepřímé měniče frekvence jsou složeny z usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu a střídače. Podle prvku zapojeného ve stejnosměrném meziobvodu se rozlišují napětěvé a proudové měniče. U vysokonapětových měničů frekvence se používají víceúrovňové napětěvé

měníče frekvence. Topologie víceúrovňových měničů bude blíže charakterizována u konkrétních typů měničů.

3.3.2.1 Vysokonapětový měnič frekvence ACS 580 MV

ACS 580 MV se řadí mezi vysokonapětové měniče frekvence využívající kaskádní topologii víceúrovňových střídačů tzv. kaskádní spojení H — můstků. Kaskádní topologie se skládá ze sériově zapojených jednofázových H — můstků [31]. Každý H — můstek obsahuje čtyři výkonové spínací součástky a jeden stejnosměrný napětový zdroj. V případě ACS 580 MV je každý H — můstek napájen svým diodovým můstkem a společně tvoří modul. Tento modul je napájen nízkým střídavým napětím o hodnotě 730 V. Využití nízkonapětových výkonových součástek je velkou předností, jelikož jsou kladeny nižší nároky na izolační vzdálenosti. Naopak nevýhodou je vyšší počet součástek, tím klesá spolehlivost. Pro napájení jednotlivých modulů je použit integrovaný transformátor. Výhodou této technologie je vysoký počet úrovní výstupního napětí (jedná se o téměř sinusový průběh, zkreslení výstupního napětí se pohybuje okolo 2 % [32][32]), proto jsou tyto měniče vhodné pro napájení starších motorů [32]. Uspořádání jednotlivých modulů je totožné, tím roste modularita, a tím klesá výrobní cena [31]. Nevýhodou topologie je nutnost napájet každý modul samostatně. Alternativními vysokonapětovými měniči k ACS 580MV jsou měniče ATV 6000 od firmy Schneider Electric nebo PowerFlex 6000 od firmy Rockwell Automation, které využívají taktéž kaskádní topologii. Parametry ACS 580 MV vhodného pro asynchronní motor hlavního čerpadla jsou součástí **Přílohy D**.



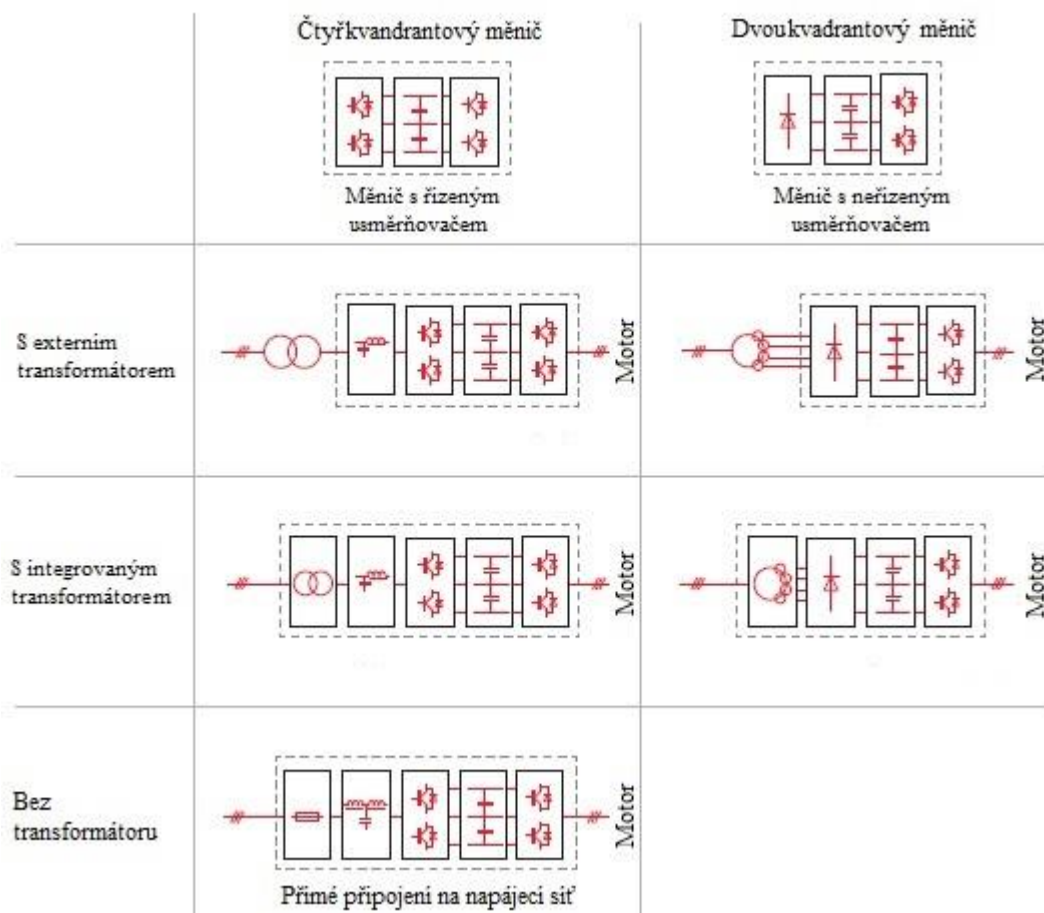
Obrázek 15: Blokové schéma vysokonapětového měniče ACS 500 MV[32]

3.3.2.2 Vysokonapětový měnič frekvence ACS 2000

ACS 2000 využívá topologii víceúrovňového střídače s upínacími diodami. V této topologii se využívají vysokonapětové spínací součástky HVIGBT. Oproti kaskádní topologii je zde nutný pouze jeden napětový zdroj. Tato topologie využívá kondenzátorů, které slouží k rozdělení stejnosměrného napětí. Počet kondenzátorů závisí na počtu úrovní měniče. V současné době se

distribuuji čtyř, pěti a šesti úrovněové měniče. Počet úrovní znamená počet možných výstupních hodnot napětí. Měniče obsahují upínací diody, pomocí kterých je vytvořen ve stejnosměrném meziobvodu tzv. nulový bod. Nevýhodou této topologie je kolísání napětí na kapacitním děliči [33]. Z důvodu propojení jednotlivých fází s nulovým bodem dochází ke vzájemnému ovlivňování poměrů v jednotlivých fázích [31]. Měnič je schopný čtyřkvadrantového provozu.

V měničích ACS 2000 se využívá bezpojistikového konceptu. K detekci poruchy dochází ve dvou úrovních. V první úrovni je implementovaná rychlá detekce zkratu přímo v polovodičových spínacích součástkách. Jako spínací součástky se v ACS 2000 využívají IGBT. IGBT je sám o sobě schopný omezit zkratový proud. Zkrat se identifikuje podle velikosti napětí na sepnutém spínacím prvku. Pokud dojde překročení saturačního proudu součástky, součástka se snaží omezovat protékající proud zvýšením napětím. Zvýšené napětí se detekuje a IGBT vypne. Pokud je zkrat detekován do 12 μ s, IGBT je zkrat schopný vypnout. V případě, že k detekci nedojde do 18 μ s, dochází k zapůsobení druhé úrovně. Nejprve nastane sepnutí ochranného tyristorového obvodu, ve kterém nastane vybití nashromážděné energie zkratu, poté k odpojení měniče. Ve druhé úrovni je využita detekce di/dt pomocí VLSCD desek. Využívá se indukčnosti, která při zkratu indukuje vyšší napětí, oproti bezporuchovému stavu. Model ACS 580 MV neobsahuje ochranný tyristorový obvod ani VLSCD desku, na každém modulu jsou na dvou fázích osazeny tavné pojistky. Na rozdíl od ACS 580 MV měnič ACS 2000 lze do 2 MW provozovat bez transformátoru. V případě vyšších výkonů se distribuuje buď s integrovaným transformátorem, nebo s externím transformátorem. Vytváří více příležitostí k instalaci v místech, ve kterých není dostatek prostoru. Parametry ACS 2000 vhodné pro asynchronní motor hlavního čerpadla jsou součástí **Přílohy D**.



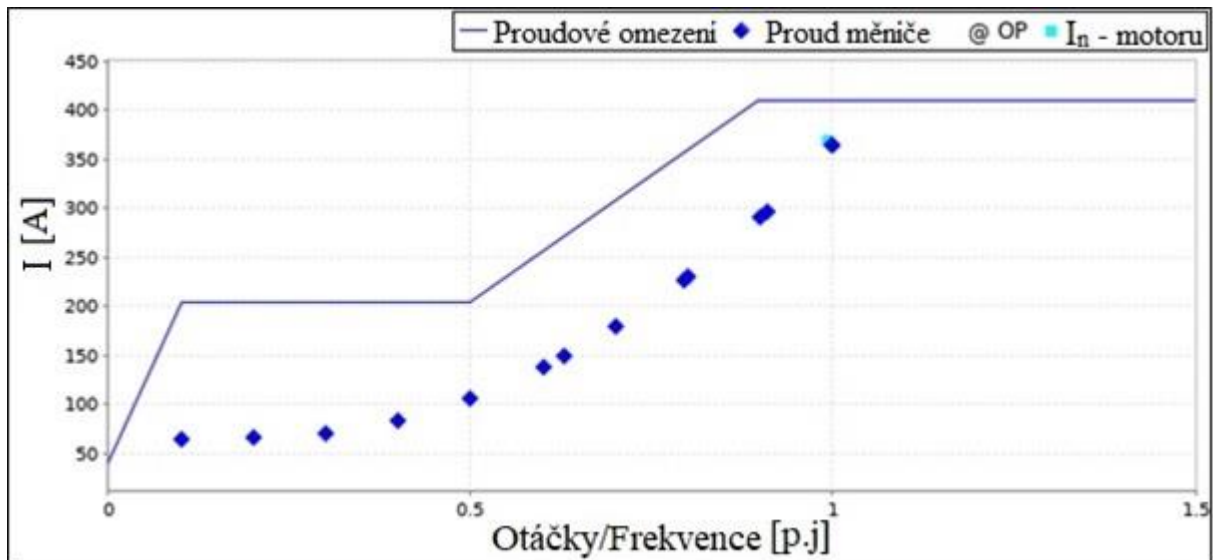
Obrázek 16: Dostupné konfigurace ACS 2000 [34]

3.3.2.3 Topologie M²C měniče od Siemensu

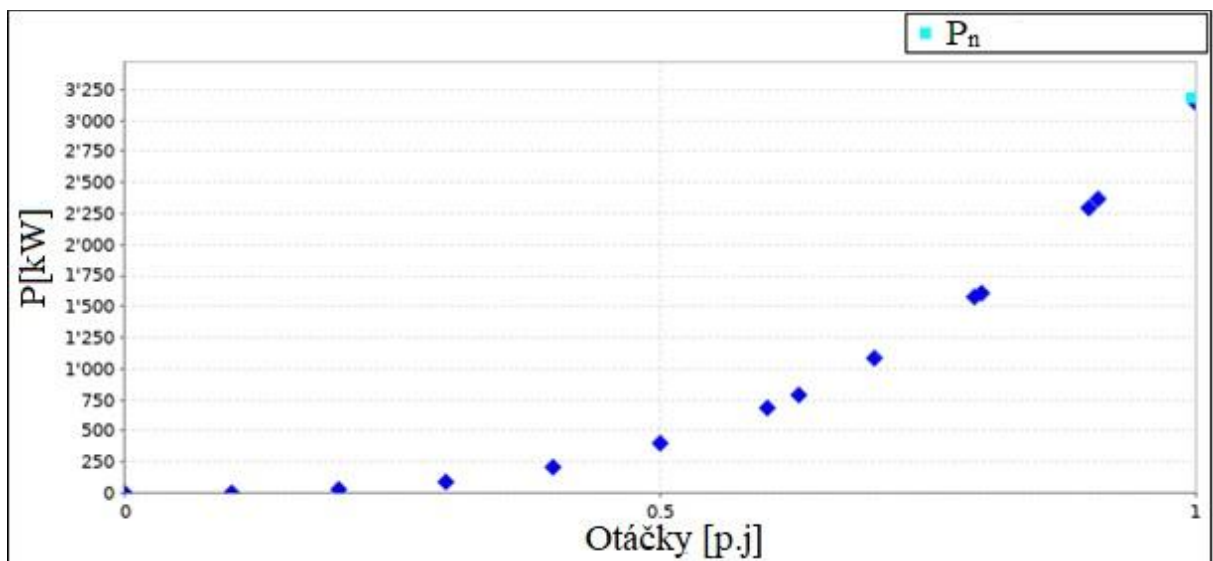
Jedná se nejnovější topologii, kterou využívají některé měniče od firmy Siemens. Měnič se pro každou fázi výstupního napětí skládá ze dvou odboček obsahujících tzv. submoduly (půlmůstky). Složení se podobá kaskádní topologii. M²C neobsahuje ve stejnosměrném obvodu kondenzátor, tím roste odolnost vůči zkratům [31]. Jednotlivé submoduly jsou monitorovány a řízeny samostatně, čímž se dosahuje vysoké účinnosti a dynamiky řízení. K výměně poškozených submodulů může docházet za provozu [35]. Měnič je vhodný pro napájení starších motorů, jelikož výstupní napětí je téměř sinusové. Topologie M²C je využívána u vysokonapěťového měniče Sinamics perfect harmony GH150. Tento měnič se distribuuje od 4 MW, pro řešený příklad by byl měnič nadbytečně předdimenzovaný. Moderní vysokonapěťové měniče dokáží napájet více motorů najednou, proto by mohl být využit pro napájení dvou asynchronních motorů hlavních čerpadel v jedné kóji. Hlavní nevýhoda tohoto řešení spočívá, ve spolehlivosti provozu čerpadel. Pokud by došlo k odstavení měniče z důvodu poruchy, nebo údržby. Dvě čerpadla by nebyla provozu schopná. Tento nedostatek by mohl být vyřešen „bypassem“ měniče, který by s sebou přinášel další úskalí (instalace dalších vypínačů, kabelového vedení, vytvoření logiky do řídicího systému.

3.3.2.4 Simulace spouštění asynchronního motoru hlavních čerpadel s ACS 580 MV

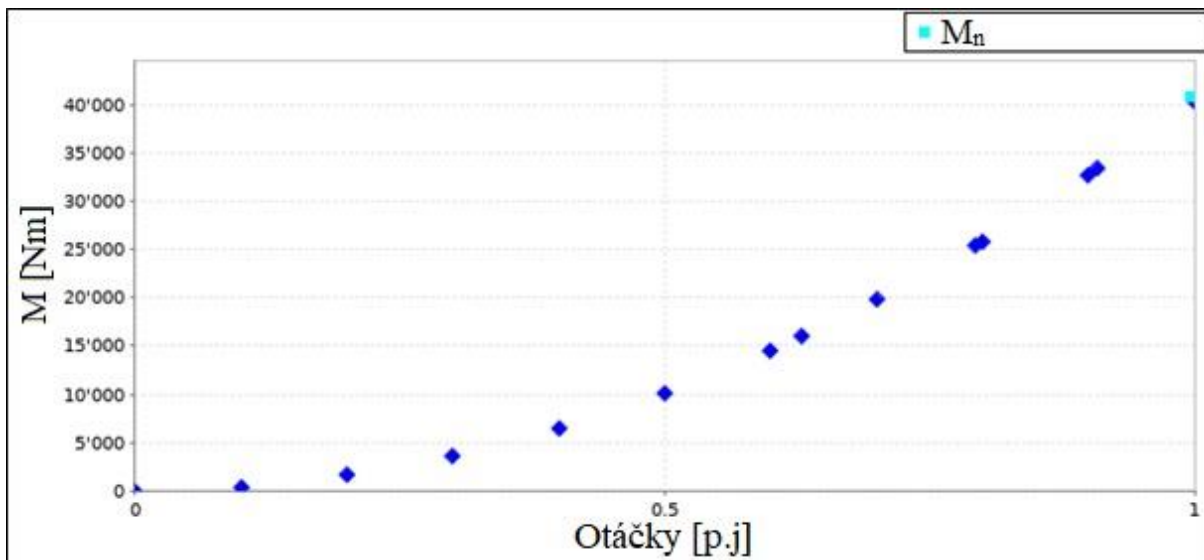
Simulace byla provedena společností ABB. Pro spouštění asynchronního motoru hlavního čerpadla byl zvolen měnič frekvence ACS 580 MV (ACS580MV-07-0360A-060) distribuovaný firmou ABB.



Obrázek 17: Závislost proudu měniče na otáčkách asynchronního motoru[36]



Obrázek 18: Závislost výkonu na otáčkách asynchronního motoru[36]



Obrázek 19: Závislost momentu na otáčkách asynchronního motoru[36]

Z výsledků simulace vyplývá, že pro spouštění asynchronního motoru hlavního čerpadla ČSH vysokonapětovým měničem frekvence je možné využít hydrogenerátor EHN. Na **Obrázku 17** je znázorněna závislost odebíraného proudu měniče během spouštění asynchronního motoru. Při spouštění motor není proudově přetěžován, čímž dochází k prodloužení jeho životnosti. Jelikož se během spouštění měničem frekvence dosahuje v každé rychlosti maximálního momentu, není nutné dosáhnout jmenovitých otáček asynchronního motoru co nejrychleji. Rozběh lze přizpůsobit regulaci buzení, regulaci rozváděcího a oběžného kola EHN. Tím lze dosáhnout též plynulého rozběhu asynchronního motoru. Na **Obrázku 19** je vynesena závislost momentu motoru na jeho otáčkách, ze které lze vypočítat eliminaci velkého záběrného momentu. Touto eliminací dochází k nižší míře opotřebení mechanických částí a tím pádem i k prodloužení životnosti čerpadla, motoru a armatur.

3.3.2.5 Umístění vysokonapětového měniče frekvence v čerpací stanici Hněvkovice

Prostor v kójiích asynchronních motorů hlavních čerpadel ČSH, který by byl pro umístění vysokonapětového měniče nejvhodnější (z hlediska využití současných kabelů, stavebních úprav a připojení), je hlavním limitujícím faktorem. Proběhlo orientační měření všech tří kójí, pouze jedna kóje disponovala dostatečným prostorem pro umístění vysokonapětových měničů s integrovaným transformátorem. Do této kóje by bylo možné umístit měniče ACS 2000 s délkou 5 100 mm, ACS 580 MV s délkou 5 850 mm, ATV 6000 s délkou 5 760 mm. Sinamics perfect harmony GH150 s délkou 8 100 mm disponuje nevyhovujícími rozměry. Pro ostatní kóje je jediným možným řešením využít ACS 2000 s externím transformátorem (délka 2 500 mm). Externí transformátor by mohl být umístěn v R6kV a samotný měnič v kóji. Při realizaci tohoto řešení by nemohly být využity současné vysokonapětové kabely a byly by nutné stavební úpravy

v R6kV. Z důvodu vyšší hmotnosti měničů by měla být ověřena nosnost podlahy, např. ACS 580 MV váží 10 300 kg.

Dalším možným řešením instalace měniče by bylo umístění na „balkón“, který disponuje dostatečným prostorem pro všechny typy měničů. V tomto řešení by byly ale potřebné rozsáhlejší stavební a technologické práce oproti předchozím návrhům.

3.3.2.6 Hodnocení vysokonapěťového měniče frekvence pro spuštění asynchronního motoru hlavních čerpadel v separátním provozu s hydrogenerátorem malé vodní elektrárny Hněvkovice

Vysokonapěťový měnič byl vyhodnocen jako jediné možné řešení pro uskutečnění úspěšného spuštění asynchronního motoru hlavního čerpadla pomocí hydrogenerátoru EHN v separátním provozu a jeho následném chodu. Spuštění motoru by mohlo být provedeno s ohledem na regulaci hydrogenerátoru EHN a tím by zároveň byly omezeny nežádoucí přechodové děje. V případě instalace měniče by měla být provedena diagnostika izolačního systému motoru např. pomocí ABB AbilityTIM Leap. Protože výstupní napětí z měniče obsahuje vyšší harmonické, dochází k vyššímu namáhání hlavní ale i mezizávitové izolace, zejména k namáhání izolace prvních napájených cívek. Vyšší harmonické lze eliminovat přídavným výstupním filtrem, který může být k měničům dodán. Dalším problémem při napájení motoru z měničů jsou vyšší ložiskové proudy. Ložiskové proudy se na ložisku objeví v případech, ve kterých se na ložisku objeví napětí dostatečné k narušení izolačních vlastností maziva. Pro eliminaci ložiskových proudů by mělo být jedno z ložisek nahrazeno izolovaným ložiskem.

3.4 Zkratové poměry při separátním provozu čerpací stanice Hněvkovice s malou vodní elektrárnou

Zkratové poměry v separátním provozu bylo nutné spočítat pro ověření citlivosti nadproudových ochran. Pro výpočet byla zvolena metoda „Ekvivalentního zdroje napětí“ v místě zkratu. Metoda je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, který je jediným aktivním napětím v soustavě. Ostatní prvky jsou nahrazeny svými zkratovými impedancemi. Napětí zavedeného ekvivalentního napěťového zdroje je dáno jmenovitým napětím sítě v místě zkratu, vynásobeným napěťovým součinitelem. Tento napěťový součinitel zahrnuje kolísání napětí v čase, chování synchronních a asynchronních strojů při přechodových dějích, kapacitní reaktance a přepínání odboček transformátorů. U metody ekvivalentního zdroje v místě zkratu není potřeba provádět výpočty výkonových toků v různých stavech před zkratem. Provozní údaje o odběrech, poloze přepínače odboček transformátoru, buzení generátoru nejsou potřebné. Pro výpočet koeficientu citlivosti elektrických ochran se používá minimální zkratový proud. Při

výpočtu minimálních zkratových proudů se uvažuje konfigurace sítě a minimální příspěvky zkratových proudů od zdrojů tak, aby vedly k nejmenší hodnotě zkratového proudu v místě zkratu [37]. Hodnota napěťového součinitele ekvivalentního napěťového zdroje je pro výpočet minimálních zkratových proudů dle normy [38] pro sítě nad 1 kV rovna jedné. Všechny výpočty provedené v podkapitole 3.4 byly provedeny podle normy [38].

Tabulka 10: Parametry prvků pro výpočty minimálních zkratových proudů při separátním provozu EHN a ČSH[4, 9]

Hydrogenerátor EHN		
S_{nG}	5400	kVA
U_{nG}	6,3	kV
$\cos\varphi$	0,8	—
φ	36,87	°
x_d''	0,188	—
x_2	0,201	—
x_0	0,078	—
Kabelové vedení EHN — ČSH (3x6-AYKCY 1x500) ¹		
l	320	m
r_1	0,0605	$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$
L	0,456	$\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$
Kabelové vedení R6kV — Motor hlavního čerpadla (2x6-AYKCY 3x240) ¹		
l	88 ²	m
r_2	0,125	$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$
L	0,28	$\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$

¹Parametry kabelů nebyly k dispozici, proto byly převzaty z katalogů [39, 40]

²Vzdálenost kabelového vedení se u jednotlivých motorů hlavních čerpadel liší, pro výpočet minimálního zkratového výkonu bylo zvoleno nejdelší kabelové vedení.

3.4.1 Náhradní zkratové impedance prvků

3.4.1.1 Zkratová impedance hydrogenerátoru malé vodní elektrárny Hněvkovice

- Sousedná reaktance generátoru:

$$X_{(1)G} = x_d'' \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} = 0,188 \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{5400 \cdot 10^3} = 1,38 \Omega \quad (3-6)$$

- Zpětná reaktance generátoru:

$$X_{(2)G} = x_2 \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} = 0,201 \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{5400 \cdot 10^3} = 1,48 \Omega \quad (3-7)$$

- Netočivá reaktance generátoru:

$$X_{(0)G} = x_0 \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} = 0,078 \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{5400 \cdot 10^3} = 0,57 \Omega \quad (3-8)$$

Pro výpočet rezistance generátoru bude použita fiktivní rezistance R_{GF} , použití fiktivní rezistance povoluje [38].

- Sousedná rezistance generátoru:

$$R_{(1)GF} = 0,07 \cdot X_{(1)G} = 0,07 \cdot 1,38 = 0,097 \Omega \quad (3-9)$$

- Zpětná rezistance generátoru:

$$R_{(2)GF} = 0,07 \cdot X_{(2)G} = 0,07 \cdot 1,48 = 0,104 \Omega \quad (3-10)$$

- Sousedná rezistance generátoru:

$$R_{(0)GF} = 0,07 \cdot X_{(0)G} = 0,07 \cdot 0,57 = 0,04 \Omega \quad (3-11)$$

- Impedanční korekční součinitel K_G :

$$K_G = \frac{U_{nS}}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,188 \cdot \sin 36,87} = 0,99 \quad (3-12)$$

- Výsledná sousledná zkratová impedance generátoru:

$$\underline{Z}_{(1)G} = K_G \cdot (R_{(1)GF} + jX_{(1)G}) = 0,99 \cdot (0,097 + 1,38j) = 0,096 + 1,37j \Omega \quad (3-13)$$

- Výsledná zpětná zkratová impedance generátoru:

$$\underline{Z}_{(2)G} = K_G \cdot (R_{(2)GF} + jX_{(2)G}) = 0,99 \cdot (0,104 + 1,48j) = 0,1 + 1,45j \Omega \quad (3-14)$$

- Výsledná netočivá zkratová impedance generátoru:

$$\underline{Z}_{(0)G} = K_G \cdot (R_{(0)GF} + jX_{(0)G}) = 0,99 \cdot (0,04 + 0,57j) = 0,042 + 0,6j \Omega \quad (3-15)$$

3.4.1.2 Zkratové impedance kabelových vedení

- Rezistance kabelového vedení z EHN do R6kV ČSH:

$$R_{V1} = 3 \cdot r_1 \cdot l = 3 \cdot 0,0605 \cdot 0,32 = 0,057 \Omega \quad (3-16)$$

- Rezistance kabelového vedení z R6kV k motoru hlavního čerpadla:

$$R_{V2} = r_2 \cdot l = 0,125 \cdot 0,088 = 0,01 \Omega \quad (3-17)$$

- Indukčnost kabelového vedení z EHN do R6kV ČSH:

$$L_{V1} = 3 \cdot L_1 \cdot l = 3 \cdot 0,456 \cdot 0,32 = 0,438 \text{ mH} \quad (3-18)$$

- Indukčnost kabelového vedení z EHN do R6kV ČSH:

$$L_{V2} = L_2 \cdot l = 0,28 \cdot 0,088 = 0,023 \text{ mH} \quad (3-19)$$

- Reaktance kabelového vedení z EHN do R6kV ČSH:

$$X_{LV1} = 2\pi \cdot f \cdot L_{V1} = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,438 \cdot 10^{-3} = 0,138 \Omega \quad (3-20)$$

- Reaktance kabelového vedení z R6kV k motoru hlavního čerpadla:

$$X_{LV2} = 2\pi \cdot f \cdot L_{V2} = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,023 \cdot 10^{-3} = 0,007 \Omega \quad (3-21)$$

- Výsledná zkratová impedance vedení z EHN do R6kV ČSH:

$$\underline{Z}_{V1} = R_{V1} + jX_{LV1} = 0,057 + 0,138j = 0,057 + 0,138j \Omega \quad (3-22)$$

- Výsledná zkratová impedance vedení z R6kV k motoru hlavního čerpadla:

$$\underline{Z}_{V2} = R_{V2} + jX_{LV1} = 0,01 + 0,007j = 0,01 + 0,007j \Omega \quad (3-23)$$

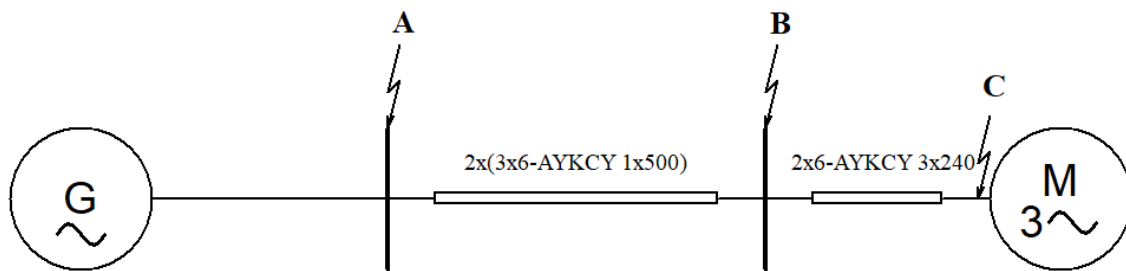
Sousledné, zpětné a netočivé zkratové impedance vedení jsou považovány za totožné. Netočivou zkratovou impedanci kabelového vedení je obtížné určit [37]. Jelikož k minimálnímu zkratovému proudu dochází převážně při dvoufázovém zkratu, netočivá zkratová impedance není pro výpočet významná.

$$\underline{Z}_{(1)V1} = \underline{Z}_{(2)V1} = \underline{Z}_{(0)V1} \quad (3-24)$$

$$\underline{Z}_{(1)V2} = \underline{Z}_{(2)V2} = \underline{Z}_{(0)V2} \quad (3-25)$$

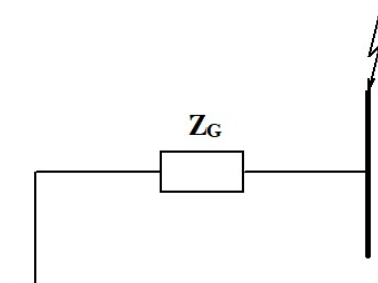
3.4.2 Výpočet minimálního zkratového proudu

Výpočet minimálních zkratových proudů bude proveden v místech, ve kterých dochází k měření proudů pro ochrany v R6 kV EHN (na **Obrázku 20** označeném bodem A), v R6 kV ČSH (na **Obrázku 20** označeném bodem B) a na přívodu asynchronního motoru hlavního čerpadla (na **Obrázku 20** označeném bodem C).



Obrázek 20: Schéma separátního provozu ČSH a EHN pro výpočet minimálního zkratového proudu

3.4.2.1 Výpočet minimálního zkratového proudu v místě A



Obrázek 21: Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu v místě A

- Výpočet minimálního trojfázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$I_k'' = \frac{c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{(1)G}} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (0,096 + 1,37j)} = 185 - 2\,642j \text{ A} \quad (3-26)$$

$$I_k'' = \frac{c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_{(1)G}|} = \frac{c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{(1)FG}^2 + X_{(1)G}^2}} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,097^2 + 1,37^2}} = \mathbf{2\,648 \text{ A}} \quad (3-27)$$

- Výpočet minimálního dvoufázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$I_{k2}'' = \frac{c_{\min} \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)G} + \underline{Z}_{(2)G}} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{(0,096 + 1,37j) + (0,1 + 1,45j)} = 155 - 2\,223j \text{ A} \quad (3-28)$$

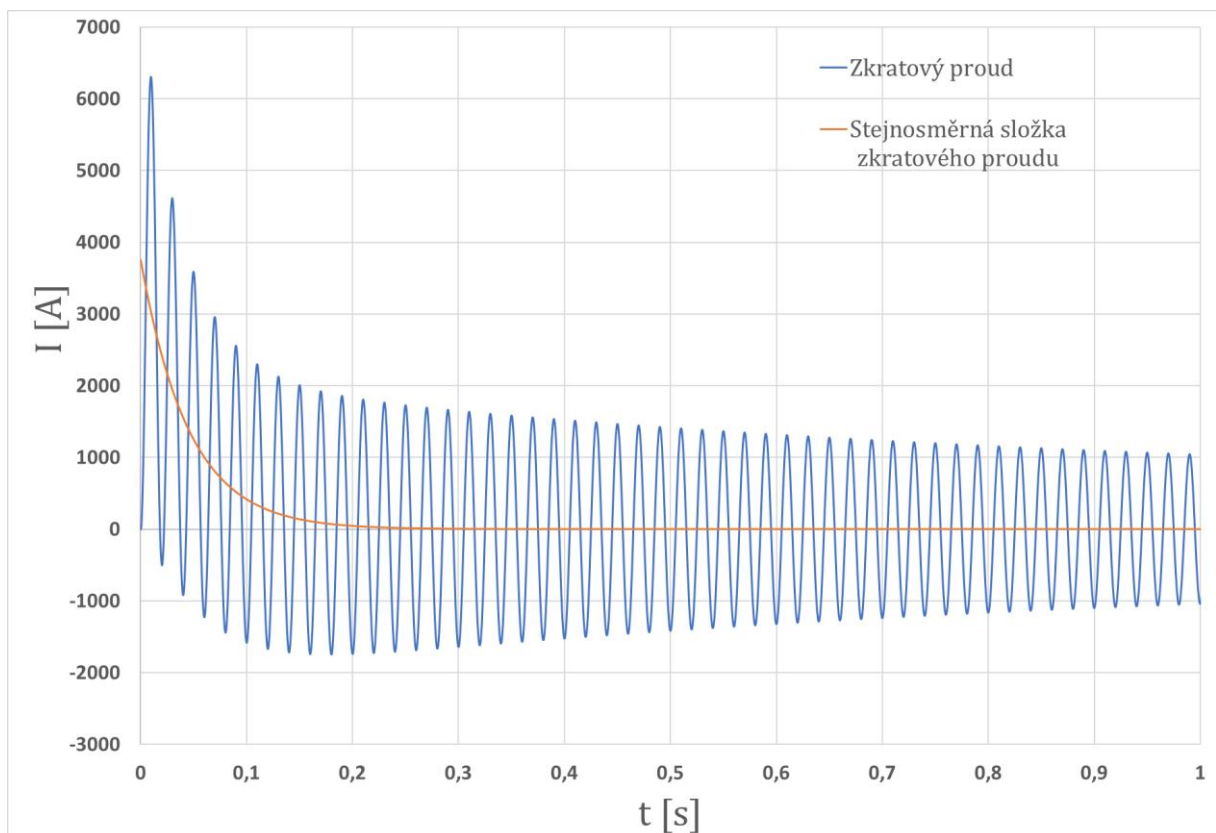
$$I_{k2}'' = |I_{k2}''| = \mathbf{2\,228 \text{ A}} \quad (3-29)$$

- Výpočet minimálního jednofázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c_{\min} \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)G} + \underline{Z}_{(2)G} + \underline{Z}_{(0)G}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{(0,096 + 1,37j) + (0,1 + 1,45j) + (0,042 + 0,6j)} \quad (3-30)$$

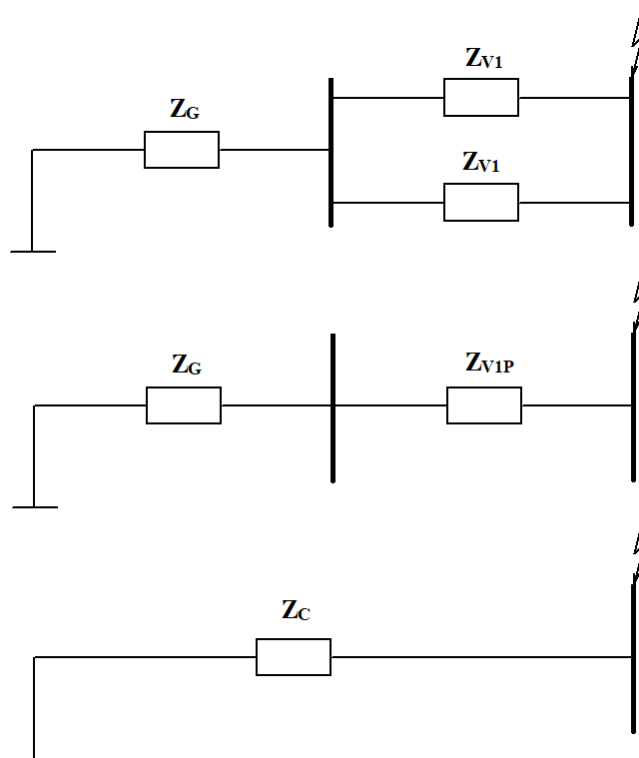
$$= 221 - 3\,175j \text{ A}$$

$$I_{k1}'' = |I_{k1}''| = \mathbf{3\,182 \text{ A}} \quad (3-31)$$



Obrázek 22: Průběh třífázového zkratového proudu při zkratu v místě A s maximální stejnosměrnou složkou

3.4.2.2 Výpočet minimálního zkratového proudu v místě B



Obrázek 23: Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu v místě B s postupným zjednodušováním

- Výpočet sousledné celkové zkratové impedance:

$$\underline{Z}_{(1)V1P} = \frac{\underline{Z}_{(1)V1} \cdot \underline{Z}_{(1)V1}}{\underline{Z}_{(1)V1} + \underline{Z}_{(1)V1}} = \frac{(0,057 + 0,138j) \cdot (0,057 + 0,138j)}{(0,057 + 0,138j) + (0,057 + 0,138j)} = 0,029 + 0,069j \Omega \quad (3-32)$$

$$\underline{Z}_{(1)C} = \underline{Z}_{(1)G} + \underline{Z}_{(1)V1P} = (0,096 + 1,37j) + (0,029 + 0,069j) = 0,125 + 1,439j \Omega \quad (3-33)$$

- Výpočet zpětné celkové zkratové impedance:

$$\underline{Z}_{(2)V1P} = \underline{Z}_{(1)V1P} = 0,029 + 0,069j \Omega \quad (3-34)$$

$$\underline{Z}_{(2)C} = \underline{Z}_{(2)G} + \underline{Z}_{(2)V1P} = (0,1 + 1,45j) + (0,029 + 0,069j) = 0,129 + 1,52j \Omega \quad (3-35)$$

- Výpočet netočivé celkové zkratové impedance:

$$\underline{Z}_{(0)V1P} = \underline{Z}_{(2)V1P} = \underline{Z}_{(1)V1P} = 0,029 + 0,069j \Omega \quad (3-36)$$

$$\underline{Z}_{(0)C} = \underline{Z}_{(0)G} + \underline{Z}_{(0)V1P} = (0,042 + 0,6j) + (0,029 + 0,069j) = 0,071 + 0,67j \Omega \quad (3-37)$$

- Výpočet minimálního trojfázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$I_k'' = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{(1)C}} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (0,125 + 1,439j)} = 218 - 2508j \text{ A} \quad (3-38)$$

$$I_k'' = |I_k''| = 2 \text{ 518 A} \quad (3-39)$$

- Výpočet minimálního dvoufázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$\underline{I}_{k2}'' = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)C} + \underline{Z}_{(2)C}} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{(0,125 + 1,439j) + (0,129 + 1,52j)} = 181 - 2113j \text{ A} \quad (3-40)$$

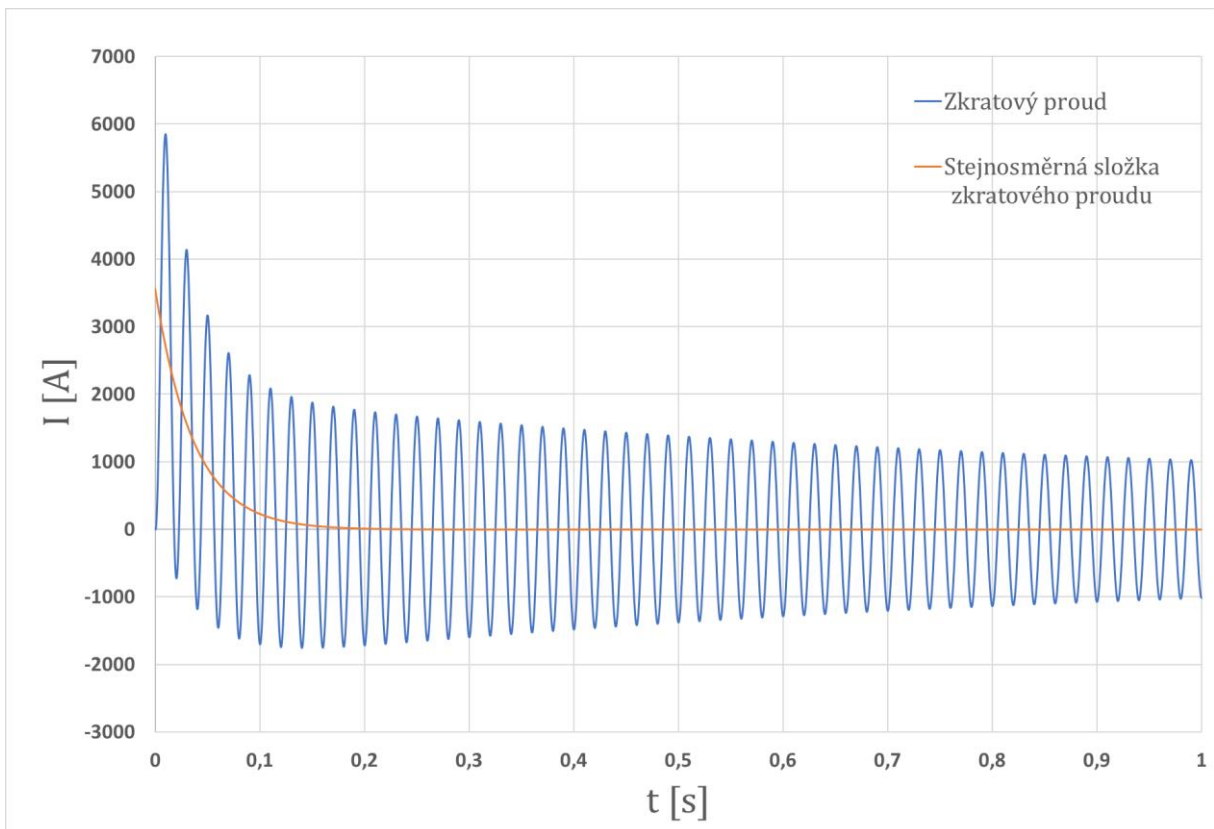
$$I_{k2}'' = |\underline{I}_{k2}''| = 2\,121 \text{ A} \quad (3-41)$$

- Výpočet minimálního jednofázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c_{min} \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)C} + \underline{Z}_{(2)C} + \underline{Z}_{(0)C}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{(0,125 + 1,439j) + (0,129 + 1,52j) + (0,071 + 0,67j)} \quad (3-42)$$

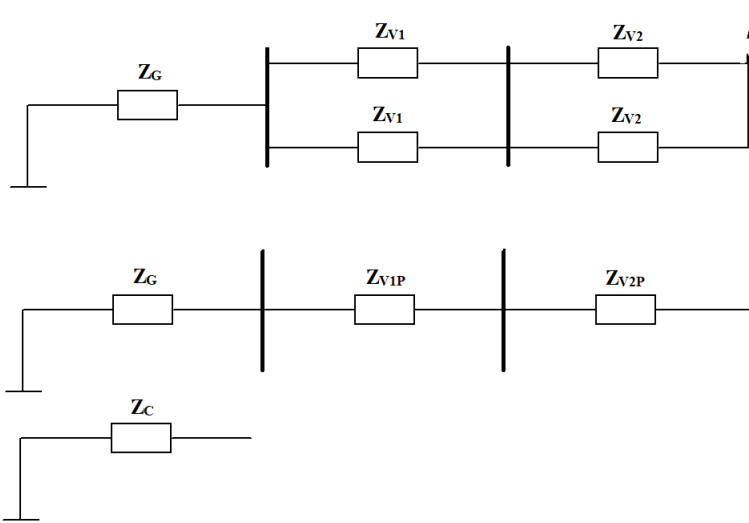
$$= 267 - 2982j \text{ A}$$

$$I_{k2}'' = |\underline{I}_{k2}''| = 2\,993 \text{ A} \quad (3-43)$$



Obrázek 24: Průběh trojfázového zkratového proudu při zkratu v místě B s maximální stejnosměrnou složkou

3.4.2.3 Výpočet minimálního zkratového proudu v místě C



Obrázek 25: Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu v místě C s postupným zjednodušováním

- Výpočet sousledné celkové zkratové impedance:

$$\underline{Z}_{(1)V1P} = \frac{\underline{Z}_{(1)V1} \cdot \underline{Z}_{(1)V1}}{\underline{Z}_{(1)V1} + \underline{Z}_{(1)V1}} = \frac{(0,057 + 0,138j) \cdot (0,057 + 0,138j)}{(0,057 + 0,138j) + (0,057 + 0,138j)} = 0,029 + 0,069j \Omega \quad (3-44)$$

$$\underline{Z}_{(1)V2P} = \frac{\underline{Z}_{(1)V2} \cdot \underline{Z}_{(1)V2}}{\underline{Z}_{(1)V2} + \underline{Z}_{(1)V2}} = \frac{(0,01 + 0,007j) \cdot (0,01 + 0,007j)}{(0,01 + 0,007j) + (0,01 + 0,007j)} = 0,005 + 0,004j \Omega \quad (3-45)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(1)C} &= \underline{Z}_{(1)G} + \underline{Z}_{(1)V1P} + \underline{Z}_{(1)V2P} = \\ &= (0,096 + 1,37j) + (0,029 + 0,069j) + (0,005 + 0,004j) = 0,13 + 1,443j \Omega \end{aligned} \quad (3-46)$$

- Výpočet zpětné celkové zkratové impedance:

$$\underline{Z}_{(2)V1P} = \underline{Z}_{(1)V1P} = 0,029 + 0,069j \Omega \quad (3-47)$$

$$\underline{Z}_{(2)V2P} = \underline{Z}_{(1)V2P} = 0,005 + 0,004j \Omega \quad (3-48)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(2)C} &= \underline{Z}_{(2)G} + \underline{Z}_{(2)V1P} + \underline{Z}_{(2)V2P} \\ &= (0,1 + 1,45j) + (0,029 + 0,069j) + (0,005 + 0,004j) = 0,134 + 1,523j \Omega \end{aligned} \quad (3-49)$$

- Výpočet netočivé celkové zkratové impedance:

$$\underline{Z}_{(0)V1P} = \underline{Z}_{(1)V1P} = \underline{Z}_{(2)V1P} = 0,029 + 0,069j \Omega \quad (3-50)$$

$$\underline{Z}_{(0)V2P} = \underline{Z}_{(1)V2P} = \underline{Z}_{(2)V2P} = 0,005 + 0,004j \Omega \quad (3-51)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(0)C} &= \underline{Z}_{(0)G} + \underline{Z}_{(0)V1P} + \underline{Z}_{(0)V2P} \\ &= (0,042 + 0,6j) + (0,029 + 0,069j) + (0,005 + 0,004j) = 0,076 + 0,673j \Omega \end{aligned} \quad (3-52)$$

- Výpočet minimálního trojfázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$\underline{I}_k'' = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{(1)C}} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (0,13 + 1,443j)} = 225 - 2500j \text{ A} \quad (3-53)$$

$$I_k'' = |\underline{I}_k''| = \mathbf{2\ 510\ A} \quad (3-54)$$

- Výpočet minimálního dvoufázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$\underline{I}_{k2}'' = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)C} + \underline{Z}_{(2)C}} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{(0,23 + 1,443j) + (0,134 + 1,523j)} = 257 - 2093j \text{ A} \quad (3-55)$$

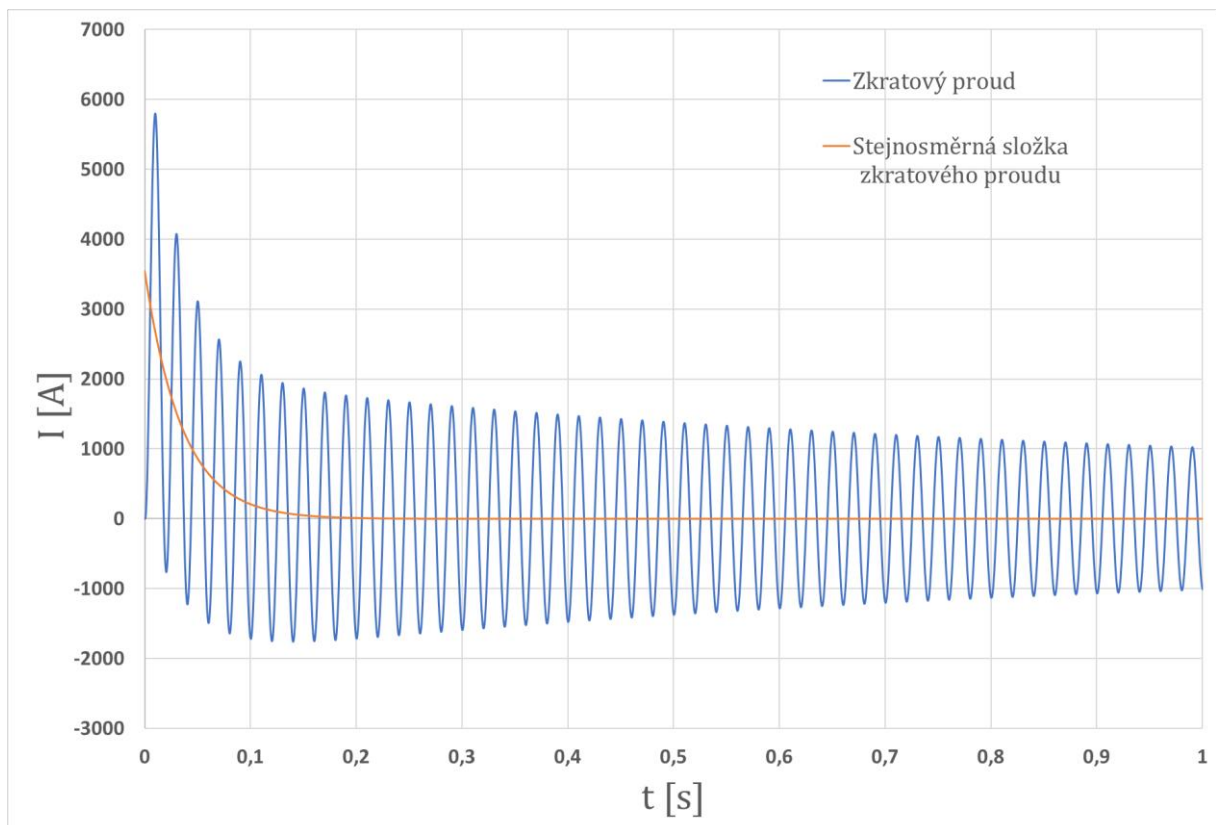
$$I_{k2}'' = |\underline{I}_{k2}''| = \mathbf{2\ 109\ A} \quad (3-56)$$

- Výpočet minimálního jednofázového počátečního rázového zkratového proudu:

$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c_{min} \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)C} + \underline{Z}_{(2)C} + \underline{Z}_{(0)C}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{(0,23 + 1,443j) + (0,134 + 1,523j) + (0,076 + 0,673j)} \quad (3-57)$$

$$= 357 - 2\ 955j \text{ A}$$

$$I_{k2}'' = |\underline{I}_{k2}''| = \mathbf{2\ 976\ A} \quad (3-58)$$



Obrázek 26: Průběh trojfázového zkratového proudu při zkratu v místě C s maximální stejnosměrnou složkou

Průběhy na **Obrázku 22**, **Obrázku 24** a **Obrázku 26** byly sestrojeny pomocí vzorců dostupných v literatuře [37].

3.5 Zkratové poměry v čerpací stanici Hněvkovice při napájení z TR Kočín

Výpočet zkratových poměrů v ČSH při napájení z vedení 110 kV bude proveden pro ověření odolnosti navrhovaného elektrického zařízení na tepelné a dynamické účinky maximálního zkratového proudu, které mohou v dané soustavě nastat. Výpočet maximálního zkratového proudu bude proveden metodou ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu viz kapitola 3.4. Pro výpočet maximálního zkratového proudu se uvažuje taková konfigurace sítě, při které dojde k maximálnímu zkratovému proudu, tzn. nastanou maximální zkratové poměry v 110 kV TR Kočín. Zároveň je uvažován provoz obou hydrogenerátorů EHN do jedné R6kV. Zkratový příspěvek od asynchronních motorů hlavních čerpadel bude nulový, jelikož při zkratu jsou motory odděleny od sítě pomocí polovodičových součástek osazených ve vysokonapěťovém měnič frekvence. Hodnota napěťového součinitele ekvivalentního napěťového zdroje je pro výpočet maximálních zkratových proudů dle normy [38] pro sítě nad 1 kV rovna 1,1. Všechny výpočty realizované v podkapitole 3.5.1 byly provedeny podle normy [38].

Tabulka 11: Parametry prvků pro výpočet maximálního zkratového proudu při napájení z vedení 110 kV [9, 10]

TR Kočín 110 kV		
I''_k	30,8	kA
U_{nS}	110	kV
Vedení TR Kočín — ČSH		
l	8,45	km
$R_{(1)}$	1,06	Ω
$X_{(1)}$	3,34	Ω
Transformátor T101, T102		
S_{nT}	25	MVA
U_{nT}	110/6,3	kV
u_k	10,56	%
ΔP_{kT}	164	kW
$I_{nT}^{1)}$	2291	A
Kabelové vedení od T101 — R6kV ²⁾		
l	65	m
r	0,0605	$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$
L_1	0,456	$\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$

¹⁾Jmenovitý proud na sekundární straně TRF

²⁾Parametry kabelu byly převzaty z katalogu [39].

3.5.1 Náhradní zkratové impedance prvků pro výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu

Zkratové impedance hydrogenerátoru EHN, kabelového vedení z EHN do R6kV a kabelové vedení z R6kV k asynchronním motorům hlavních čerpadel již byly spočítány v podkapitole 3.4.1. Proto nejsou v následující podkapitole zahrnuty.

3.5.1.1 Zkratové impedance síťového napáječe

- Zkratová impedance sítě přepočítaná na sekundární napětí T101:

$$Z_Q = \frac{c_{max} \cdot U_{nS}}{\sqrt{3} \cdot I_k''} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 30,8 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 7,44 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (3-59)$$

Norma [38] dovoluje použít, pokud není známá hodnota rezistance a reaktance síťového napáječe, vztahy (3-60), (3-61).

- Reaktance síťového napáječe:

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q = 7,4 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (3-60)$$

- Rezistance síťového napáječe:

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 7,4 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (3-61)$$

- Výsledná zkratová impedance síťového napáječe přepočtená na sekundární napětí T101:

$$\underline{Z}_Q = R_Q + jX_Q = 7,44 \cdot 10^{-4} + 7,4 \cdot 10^{-3}j \Omega \quad (3-62)$$

3.5.1.2 Zkratová impedance vedení 110 kV TR Kočín — ČSH

- Rezistance vedení V1346 přepočtená na sekundární napětí T101:

$$R_V = R_{(1)} \cdot \frac{1}{p^2} = 1,06 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 3,48 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (3-63)$$

- Reaktance vedení V1346 přepočtená na sekundární napětí T101:

$$X_V = X_{(1)} \cdot \frac{1}{p^2} = 3,34 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 11 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (3-64)$$

- Výsledná zkratová impedance vedení V1346 přepočtená na sekundární napětí T101:

$$\underline{Z}_V = R_V + jX_V = 3,48 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot 10^{-3}j \Omega \quad (3-65)$$

3.5.1.3 Zkratové impedance T101

- Zkratová impedance T101 vztažená na napěťovou hladinu 6,3 kV:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{10,56}{100} \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0,168 \Omega \quad (3-66)$$

- Rezistance T101:

$$R_T = \frac{P_{kT}}{3 \cdot I_{nT}^2} = \frac{164 \cdot 10^3}{3 \cdot 2291^2} = 0,01 \Omega \quad (3-67)$$

- Reaktance T101:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,168^2 - 0,01^2} = 0,1677 \Omega \quad (3-68)$$

- Výsledná zkratová impedance T101 vztažená na napěťovou hladinu 6,3 kV:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = 0,01 + 0,168j \Omega \quad (3-69)$$

3.5.1.4 Zkratová impedance kabelového vedení od T101 do R6kV

- Rezistance kabelového vedení od T101 do R6kV:

$$R_{V2} = 3 \cdot r \cdot l = 3 \cdot 0,0605 \cdot 0,065 = 12 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (3-70)$$

- Indukčnost kabelového vedení od T101 do R6kV:

$$L_{V2} = 3 \cdot L_1 \cdot l = 3 \cdot 0,456 \cdot 10^{-3} \cdot 0,065 = 8,89 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (3-71)$$

- Reaktance kabelového vedení od T101 do R6kV:

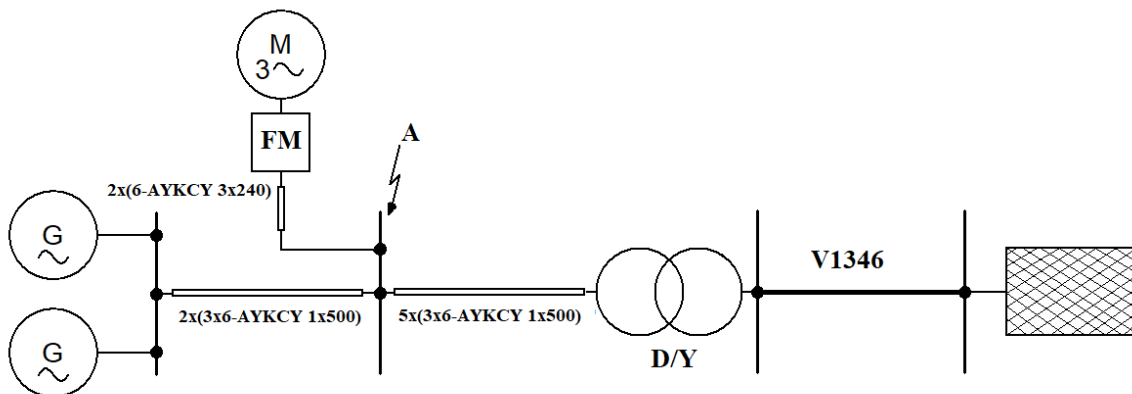
$$X_{V2} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{V2} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8,89 \cdot 10^{-5} = 0,028 \Omega \quad (3-72)$$

- Výsledná zkratová impedance kabelového vedení od T101 do R6kV:

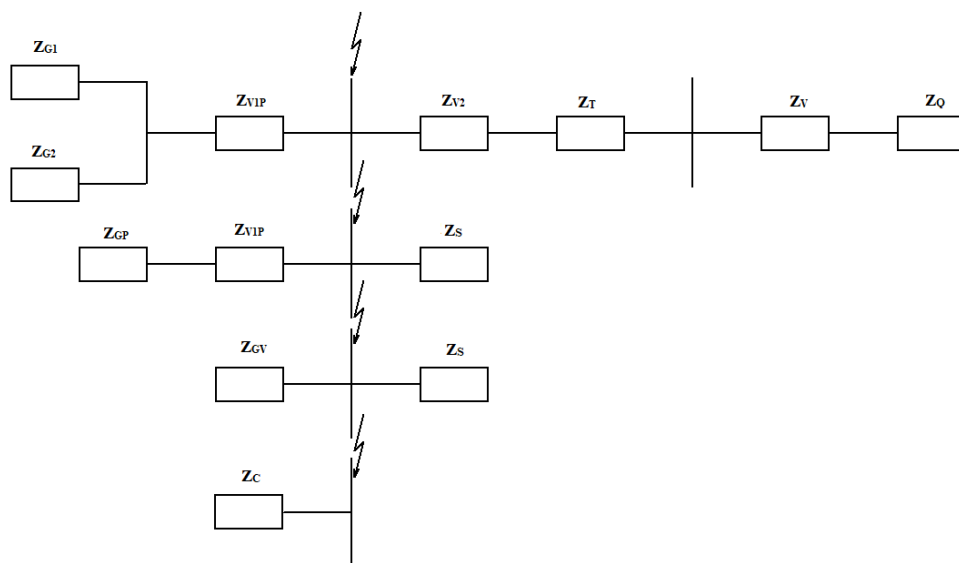
$$\underline{Z}_{V2} = R_{V2} + jX_{V2} = 12 \cdot 10^{-3} + 0,028j \Omega \quad (3-73)$$

3.5.2 Výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu

Výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu bude proveden pro zkrat v R6kV, do které se předpokládá připojení elektrických zařízení pro řízení asynchronních motorů hlavních čerpadel.



Obrázek 27: Schéma soustavy pro výpočet souměrného rázového zkratového proudu



Obrázek 28: Náhradní schéma pro výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu s postupným zjednodušováním

- Výpočet celkové zkratové impedance:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_S &= \underline{Z}_Q + \underline{Z}_V + \underline{Z}_T + \underline{Z}_{V2} = \\ &= (7,44 \cdot 10^{-4} + 7,4 \cdot 10^{-3}j) + (3,48 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot 10^{-3}j) + (0,01 + 0,168j) + \\ &\quad + (12 \cdot 10^{-3} + 0,028j) = 0,0139 + 0,225j \, \Omega \end{aligned} \quad (3-74)$$

$$\underline{Z}_{G1} = \underline{Z}_{G2} \quad (3-75)$$

$$\underline{Z}_{GP} = \frac{\underline{Z}_{G1} \cdot \underline{Z}_{G2}}{\underline{Z}_{G1} + \underline{Z}_{G2}} = \frac{(0,096 + 1,37j) \cdot (0,096 + 1,37j)}{(0,096 + 1,37j) + (0,096 + 1,37j)} = 0,048 + 0,685j \, \Omega \quad (3-76)$$

$$\underline{Z}_{GV} = \underline{Z}_{GP} + \underline{Z}_{V1P} = (0,048 + 0,685j) + (0,029 + 0,069j) = 0,077 + 0,754j \, \Omega \quad (3-77)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_{GV} \cdot \underline{Z}_S}{\underline{Z}_{GV} + \underline{Z}_S} = \frac{(0,077 + 0,754j) \cdot (0,0139 + 0,225j)}{(0,077 + 0,754j) + (0,0139 + 0,225j)} = 0,012 + 0,174j \, \Omega \quad (3-78)$$

- Výpočet souměrného rázového zkratového proudu:

$$\underline{I}_k'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_C} = \frac{1,1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (0,012 + 0,174j)} = 1\,578 - 22\,886j \, \text{A} \quad (3-79)$$

$$I_k'' = |\underline{I}_k''| = 22\,939 \, \text{A} \quad (3-80)$$

3.5.3 Výpočet nárazového zkratového proudu

Nárazový zkratový proud je maximální dosažitelná hodnota předpokládaného zkratového proudu. Nastává v takovém okamžiku zkratu, který vyvine největší stejnosměrnou složku zkratového proudu. Velikost nárazového proudu se počítá pro určení silových účinků zkratového proudu [37]. Nárazový zkratový proud nelze spočítat z celkové zkratové impedance v místě

zkratu. V radiálních sítích mohou být příspěvky do zkratu stanoveny separovaně pro každý zdroj [38].

3.5.3.1 Nárazový zkratový proud od síťového napáječe

- Výpočet souměrného rázového zkratového proudu od síťového napáječe:

$$\underline{I}_k'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_S} = \frac{1,1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (0,0139 + 0,225j)} = 1094 - 17\,715j \text{ A} \quad (3-81)$$

$$I_k'' = |\underline{I}_k''| = \mathbf{17\,748 \text{ A}} \quad (3-82)$$

- Výpočet součinitele pro výpočet nárazového zkratového proudu od síťového napáječe:

$$\kappa_S = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R_S}{X_S}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{0,0139}{0,225}} = 1,834 \text{ [—]} \quad (3-83)$$

- Výpočet nárazového zkratového proudu:

$$i_{pQ} = \kappa_S \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,834 \cdot \sqrt{2} \cdot 17\,748 = \mathbf{46\,032 \text{ A}} \quad (3-84)$$

3.5.3.2 Nárazový zkratový proud od hydrogenerátoru EHN

- Výpočet souměrného rázového zkratového proudu od hydrogenerátoru EHN:

$$\underline{I}_k'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_G} = \frac{1,1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (0,096 + 1,37j)} = 204 - 2\,906j \text{ A} \quad (3-85)$$

$$I_k'' = |\underline{I}_k''| = \mathbf{2\,913 \text{ A}} \quad (3-86)$$

- Výpočet součinitele pro výpočet nárazového zkratového proudu od hydrogenerátoru EHN:

$$\kappa_G = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{0,096}{1,37}} = 1,814 \text{ [—]} \quad (3-87)$$

- Výpočet nárazového zkratového proudu:

$$i_{pG} = \kappa_G \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,814 \cdot \sqrt{2} \cdot 2\,913 = \mathbf{7\,473 \text{ A}} \quad (3-88)$$

3.5.3.3 Celkový nárazový zkratový proud

- Výpočet celkové nárazového zkratového proudu:

$$i_p = i_{pQ} + 2 \cdot i_{pG} = \mathbf{60\,978 \text{ A}} \quad (3-89)$$

Měnič musí být vybaven vypínačem, který má jmenovitou hodnotu zkratových proudů větší než 22 939 A. Jmenovitá hodnota krátkodobého výdržného proudu musí být větší než 60 978 A.

3.6 Ověření citlivosti nadproudových ochran

Hlavním úkolem elektrických ochran je minimalizace škod způsobených poruchami v elektrické síti [41]. Přehled všech ochran ČSH a EHN je součástí **Přílohy E**. Separátní provoz ČSH a EHN není projektový stav. Nadproudové ochrany ČSH a EHN jsou nastaveny na nominální provoz, tedy napájení z 110 kV rozvodny Kočín. Jelikož v separátním provozu bude jediným zdrojem zkratového proudu hydrogenerátor EHN, je nutné ověřit schopnost ochran rozlišit stav, při kterém mají zapůsobit, od stavu, ve kterých zapůsobit nemají. Tato schopnost se u elektrických ochran vyznačuje koeficientem citlivosti. Požadované minimální koeficienty citlivosti jsou znázorněny v **Tabulce 12**.

Tabulka 12: Minimální koeficienty elektrických ochran dle [42]

Typ ochrany	Elektromechanické ochrany — k_c	Digitální ochrany — k_c
Nadproudové ochrany časově závislé	$\geq 1,5$	$\geq 1,2$
Nadproudové ochrany časově nezávislé (mžikové)	$\geq 2,0$	$\geq 1,3$
Srovnávací ochrana	$\geq 2,0$	$\geq 1,5$
Distanční ochrany	$\geq 1,5$	$\geq 1,2$

3.6.1 Výpočet minimálního koeficientu citlivosti

- Výpočet minimálního koeficientu citlivosti byl proveden dle [42].

$$k_c = \frac{I_{kmin}}{I_r} [-] \quad (3-90)$$

Tabulka 13: Vypočtené hodnoty koeficientu citlivosti jednotlivých nadproudových ochran

Chráněné zařízení	Proudové nastavení ochran I_r [A] ¹⁾	t[s]	I''_{kmin} [A]	k_{cmin} [-]	k_c [-]
Generátor EHN	1500	0,3	2228	1,2	1,49
	650	0,8	2228	1,2	3,43
Ochrany kabelového vývodu R6kV EHN na ČSH	4000	0,05	2228	1,5	0,56
	1400	0,45	2228	1,2	1,59
Vývod na asynchronní motor hlavního čerpadla	2800	0,06	2109	2,0	0,75
Vývod na EHN	10000	0	2121	2,0	0,22
	1460	0,6	2121	1,5	1,45

¹⁾Hodnota na primární straně MTP

3.6.2 Výsledky ověření citlivosti ochran v separátním provozu EHN a ČSH

Pomocí vypočtených hodnot minimálních zkratových proudů provedených v podkapitole 3.4.2 a daného proudového nastavení ochran byl určen koeficient citlivosti pro jednotlivé nadproudové ochrany. Z výsledků vyplývá, že všechny časově nezávislé nadproudové ochrany nejsou dostatečně citlivé na minimální zkratové proudy, které při separátním provozu mohou

nastat. Proto bylo navrženo vytvořit dva režimy provozu ČSH „Napájení ze sítě“ a „Separátní provoz“. Každý režim by obsahoval vlastní nastavení nadproudových ochr. Jak je zmíněno v podkapitole 1.2.4, v letošním roce dojde k odměně starých elektromechanických ochr za moderní digitální ochrany. Proto navrhované maximální proudové nastavení ochr pro „Separátní provoz“ bude vypočítáno pro minimální koeficienty citlivosti digitálních ochr, viz **Tabulka 12**.

K vypnutí zkratových proudů by mělo dojít okamžitě, aby jejich působením nedošlo k poškození zařízení nebo nedošlo k ublížení na zdraví osob. Z toho důvodu je žádoucí mít správně nastavené časově nezávislé nadproudové ochrany, které svými vlastnostmi jsou předurčeny detekovat zkrat a vydat povel k vypnutí úseku obsahujícího zkrat [41]. Nadproudové ochrany časově závislé by měly reagovat na nadproud s časovou prodlevou. Jelikož časově závislé nadproudové ochrany jsou nastaveny na parametry chráněného zařízení, jejich nastavení by se pro „Separátní provoz“ měnit nemělo. V **Tabulce 14** jsou znázorněny maximální hodnoty nadproudového nastavení ochr tak, aby splňovaly definované koeficienty citlivosti.

- Výpočet maximálního proudového nastavení ochr dle [42].

$$I_{rmax} \leq \frac{I_{kmin}}{k_{cmin}} [-] \quad (3-91)$$

Tabulka 14: Navrhované nastavení nadproudových ochr v EHN a ČSH

Chráněné zařízení	Proudové nastavení nadproudových ochr pro „Napájení ze sítě“ I_r [A]	Maximální proudové nastavení nadproudových ochr pro „Separátní provoz“ I_{rmax} [A]
Generátor EHN	1500	1500
	650	650
Ochrany kabelového vývodu R6kV	4000	1713
EHN na ČSH	1400	1400
Vývod na asynchronní motor hlavního čerpadla	2800	1622
Vývod na EHN	10000	1631
	1460	1460

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověřit možnost využití MVE Hněvkovice pro dodávku surové vody do ETE při SBO. V první řadě byla provedena analýza současného řešení SBO na EHN. Současné řešení počítá s využitím stávajícího najížděcího zdroje MDG z ETE. V ETE jsou k dispozici dva MDG, ale s vysokou pravděpodobností budou při SBO využity pro napájení systémů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti (SKŘ, doplňování primárního okruhu...). Proto byla navržena optimalizace v podobě instalace vlastního najížděcího zdroje. Jako nový najížděcí zdroj byl zvolen DG. Výběr neoptimálnější výkonové řady proběhl pomocí programu SpecSizer. Z modelu vlastní spotřeby EHN a vstupních parametrů byl programem vyhodnocen jako neoptimálnější DG o výkonu 165 kVA. Nejvíce bylo hodnocení ovlivněno způsobem spouštění asynchronních motorů v technologii EHN. Veškeré motory jsou spouštěny přímým připojením na síť. Proto byl návrh doplněn o dva scénáře, ve kterých se spouštění asynchronních motorů provádělo moderními způsoby. V prvním scénáři byly asynchronní motory o výkonu vyšším než 1 kW spouštěny pomocí softstartéru, ve druhém byly spouštěny měničem frekvence. V obou scénářích byl programem vyhodnocen jako neoptimálnější DG o výkonu 110 kVA. V případě realizace by měla být zohledněna možnost změny způsobu spuštění asynchronních motorů.

Separátní provoz asynchronního motoru hlavního čerpadla s hydrogenerátorem EHN byl úspěšně odzkoušen v roce 2016 (bez spuštění motoru). Hlavním úskalím separátního provozu je spuštění motoru, jelikož hydrogenerátor nedisponuje dostatečným zkratovým výkonem. Pro ověření byla provedena simulace, která potvrdila, že hydrogenerátor by byl při pokusu o spuštění motoru odstaven svými nadproudovými ochranami. První stupeň nadproudové generátorové ochrany by stroj odstavil do jedné sekundy. Proto bylo nutné vybrat vhodné zařízení, pomocí kterého by bylo spuštění proveditelné. Jedním z dostupných zařízení je vysokonapěťový softstartér. Softstartér disponuje několika způsoby spuštění motorů. K rozboru byla zvolena metoda spuštění motoru při konstantním záběrném proudu. Aby při spuštění nedošlo k odstavení hydrogenerátoru nadproudovými ochranami, bylo počítáno se spuštěním motoru při jmenovitém proudu hydrogenerátoru, tedy 450 A. Toto omezení znamenalo snížení vstupního napětí motoru z 6,3 kV na 1 431 V. Tento pokles měl za následek takové snížení záběrného momentu, který není schopný roztočit hlavní čerpadlo. Z toho důvodu bylo využití vysokonapěťového měniče zavrženo. Další možností je využití vysokonapěťového měniče frekvence. Z provedené simulace spuštění motoru hlavních čerpadel pomocí vysokonapěťového měniče ACS 580 MV lze vyvodit, že pomocí vysokonapěťového měniče bude spuštění motoru hlavních čerpadel v separátním provozu s hydrogenerátorem EHN uskutečnitelné. Pro co nejmenší stavební úpravy by měl být měnič umístěn přímo do kóje k ovládanému motoru, mohla by být využita stávající kabelová vedení. Bohužel pouze jedna kóje disponuje dostatečným

prostorem pro instalaci. Dalším řešením je instalace ACS 2000 s externím transformátorem. V tomto případě by se měnič mohl instalovat ve všech kójích a externí transformátor v prostorách R6 kV, ale nebude možné využít stávající kabelové vedení, protože od externího transformátoru bude potřeba vést více kabelových vedení o nižších napěťových hladinách. Poslední možnost je využít k instalaci „balkón“, který disponuje dostatečným prostorem pro instalaci všech typů měničů zmíněných v 3.3.2. V tomto případě by muselo dojít k významnějším stavebním úpravám.

Separátní provoz je mimo projektový stav. Jelikož při separátním provozu nastane odpojení největšího zdroje zkratového proudu TR Kočín. Proto bylo nezbytné ověřit citlivost nadproudových ochran. Z výsledků vyplynulo, že všechny časově nezávislé nadproudové ochrany nejsou při současném nastavení dostatečně citlivé. Bylo navrženo vytvořit dva režimy ochran pro provoz z napájení ze TR Kočín a pro separátní provoz. Doporučené nastavení časově nezávislých nadproudových ochran pro separátní provoz se nachází v **Tabulce 14**. Nastavení časově závislých nadproudových ochran je doporučeno ponechat, protože slouží k vybavení při proudovém přetěžování.

Využití separátního provozu motoru hlavního čerpadla s hydrogenerátorem EHN nemusí být pouze při stavu SBO. Separátní provoz lze využít i při dlouhodobém výpadku napájecího vedení. Napájecí vedení V1346 a V1347 jsou provedena jako dvojitá vedení a v případě zřícení stožárové konstrukce, by došlo k dlouhodobému odpojení ČSH od DS. V takovém případě by muselo dojít k odstavení ETE. Pomocí separátního provozu by mohlo docházet k částečnému čerpání surové vody do ETE, díky tomu by nemuselo dojít k okamžitému odstavení výrobních bloků.

LITERATURA

- [1] Ministersatvo průmyslu a obchodu, Dopady na ekonomiku ČR při odstavení JE v SRN. 2011. [online] [cit. 18.01.2021]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/45152/50765/583965/priloha001.pdf>
- [2] Ministerstvo životního prostředí ČR, Politika ochrany klimatu v ČR. 2017. [online][cit. 19.01.2021]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/\\$FILE/OEOK-POK-20170329.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/$FILE/OEOK-POK-20170329.pdf)
- [3] M. Sviták, I v koronavirovém roce vyrobily jaderné elektrárny přes 30 TWh elektřiny. [online] [cit. 04.01.2021]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/i-v-koronavirovem-roce-vyrobily-jadernoelektrarny-pres-30-twh-elektriny-128545>
- [4] ČEZ, a.s., Interní dokumentace EHN.
- [5] ČEZ, a.s. Při blackoutu by Temelínu pomáhalo Lipno. 2015 [online] [cit. 06.01.2021] Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/pri-blackoutu-by-temelinu-pomahalo-lipno-47726>
- [6] J. Jirout, Vodní dílo Hněvkovice-Kořensko : Voda pro jadernou elektrárnu Temelín. 1. vyd. ed. 1988, Praha: Státní zemědělské nakladatelství.
- [7] Povodí Vltavy, Manipulační řád pro vodní díla Hněvkovice, Kořensko na Vltavě. 2014.
- [8] S. Cieslar, Společnost Metrostav zahajuje rekonstrukci vodního díla Hněvkovice. [online] [cit. 30.12.2020]; Dostupné z: <https://konstrukce.cz/zajimavosti-z-oboru/spolecnost-metrostav-zahajuje-rekonstrukci-vodniho-dila-hnevkovice-459>
- [9] ČEZ, a.s., Interní dokumentace čerpací stanice Hněvkovice.
- [10] ČEPS, a.s. Interní dokumentace.
- [11] J. Doležal, J. Špetlík, S. Bouček. Zbyněk Brettschneider, Jaderné a klasické elektrárny. 2011. ISBN: 978-80-01-04936-5
- [12] ČEZ, a.s., Zátěžové testy JE – ČEZ, a.s. Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JE Temelín. 2011. [online] [cit. 10.03.2021] Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zatezove-testy-eu/provedeni-a-vysledky-zatezovych-testu-je-temelin>
- [13] World nuclear association, Fukushima Daiichi Accident. 2021 [online] [cit. 29.04.2021]; Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident.aspx>
- [14] International Atomic Energy Agency The International nuclear and radiological event scale. [online] [cit. 29.04.2021] ; Dostupné z: https://www-ns.iaea.org/downloads/iec/ines_flyer.pdf
- [15] ČEPS, a.s. Kodex PS. 2021[online] [cit. 10.03.2021] Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [16] ČEZ, a.s., Předpis pro alternativní mobilní dieselgenerátor.
- [17] Caterpillar. SpecSizer. [online] [cit. 11.03.2021] Dostupné z: <https://specsizer.cat.com/>
- [18] Dozier, C., Understanding Generator Set Ratings. 2013. [online] [cit. 28.04.2021] Dostupné z: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20140722-44605-30139>
- [19] Caterpillar, Sizing Methodology. [online] [cit. 28.04.2021] Dostupné z: <https://specsizer.cat.com/Help/Help.aspx?hcid=66>
- [20] Kurup, S.R. and S. Ashok. Performance of a hydro power plant during black start and islanded operation. in 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES). 2015.
- [21] ČSN 38 1120, Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren. 1994.
- [22] Caterpillar, Diesel generator sets C7.1(50 Hz) 135 - 220 KVA Diesel generator set. [online] [cit. 14.05.2021] Dostupné z: <https://www.cat.com/en ZA/products/new/power-systems/electric-power/diesel-generator-sets/1000001235.html>
- [23] P. Voženílek, V. Novotný, P. Mindl, Elektromechanické měniče. 2015. ISBN 978-80-01-04875-7
- [24] J. Vašínska, Softstartéry Průvodce problematikou softstartérů. 2009. [online] [cit. 14.05.2021] Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/31a495b8b7132474c1257d710037bc83/Softstartery%20-%20Pruvodce%20problematikou%20softstarteru.pdf>
- [25] K. Máslo, P. Vágner, Síťový simulátor MODES. Dostupné z: <http://www.modesinfo.com/>
- [26] Blue Panther, Jak rychle nalézt zdroj rušení, poklesů a výpadků napětí na vedení. Elektro, 2003. [online] [cit. 14.06.2021] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jak-rychle-nalezet-zdroj-ruseni-poklesu-a-vypadku-napeti-na-vedeni--14330>

- [27] N. Pavelková, Moderní pohony s asynchronními motory a měniči frekvence. AUTOMA, 2010. [online]; [cit. 15.06.2021] Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/41060.pdf
- [28] Z. Bekr, L. Kracík, Návrh softstartéru krok za krokem. 2021, Siemens, s.r.o. [online] [cit. 16.07.2021] Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:5d926969-2e81-42db-a411-0e0b850155b3/3rw50-52-55-webinar-duben-2021-cz-ext.pdf>
- [29] ABB, s.r.o., Softstartéry Typ SSM vysokonapětové 200 - 7500 hp. [online] [cit. 16.07.2021] Dostupné z: https://www.vfservis.cz/files/001462_ac1007_1_ssm_manual_cze.pdf
- [30] J. Skalický, C., Elektrické servopohony. 01.01.2002: VUT FEKT v Brně. ISBN 80-214-1978-4
- [31] P. Stejskal, Modulační techniky pro víceúrovňové střídače, Katedra elektrických pohonů a trakce. 2015, ČVUT: Praha. [cit. 19.07.2021] Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61749>
- [32] ABB, s.r.o., ACS580MV Hardware manual (200 kW to 6300 kW, 6 kV to 11 kV). [online] [cit. 18.07.2021] Dostupné z: <https://new.abb.com/drives/medium-voltage-ac-drives/acs580mv>
- [33] O. Pilný., Víceúrovňové měniče, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky. 2014, ZČU: Plzeň. [cit. 19.07.2021] Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/15383/1/Viceurovnove_menice-OndrejPilny.pdf
- [34] ABB, s.r.o., ABB industrial drives ACS 2000 drives 250 to 3680 kW. [online] [cit. 18.07.2021] Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/1252d3cb1e1348b19dbc6b798758a0d3/ACS2000_medium_voltage_drive_catalog_3BHT490640R0001_Rev1_EN.pdf
- [35] Siemens. M2C - it's short for "innovation". [online] [cit. 15.07.2021]; Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/medium-voltage-converters/m2c-technology.html>
- [36] Naděžda Pavelková, ABB., s.r.o.
- [37] J. Vokál, Výpočty zkratů v technické praxi. 2012. [online] [cit. 30.05.2021]; Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok_%20zkraty_%20prednaska_textFEL.pdf
- [38] ČSN EN 60909-0 ed.2, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. 2016.
- [39] 38.4sproducts. m-VOLT® XLPE Insulated Flat Steel Wire Armor 3 Core Aluminum Conductor 5.8/10 kV. [online] [cit. 15.06.2021] Dostupné z: <https://4sproducts.com/product/m-volt-xlpe-insulated-flat-steel-wire-armor-3-core-aluminum-conductor-5-8-10-kv/>
- [40] nktcables, 6-AYKCY třížilové / three core. [online] [cit. 15.06.2021] Dostupné z: <http://www.ceha-kdc.cz/eshop/cat/01/01-04-001-39620.pdf>
- [41] J. Tlustý, J. Kyncl, L. Musil, J. Špetlík, J. Švec, P. Hamouz, M. Müller, Z. Müller, Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. 2011. [cit. 20.07.2021] ISBN 978-80-01-04940-2
- [42] PNE 38 4065 3. ed, Provoz, Navrhování a zkoušení ochran a automatik.

PŘÍLOHA A: PŘÍKLAD SEZNAMU SYMBOLŮ A ZKRATEK

A.1 Seznam symbolů

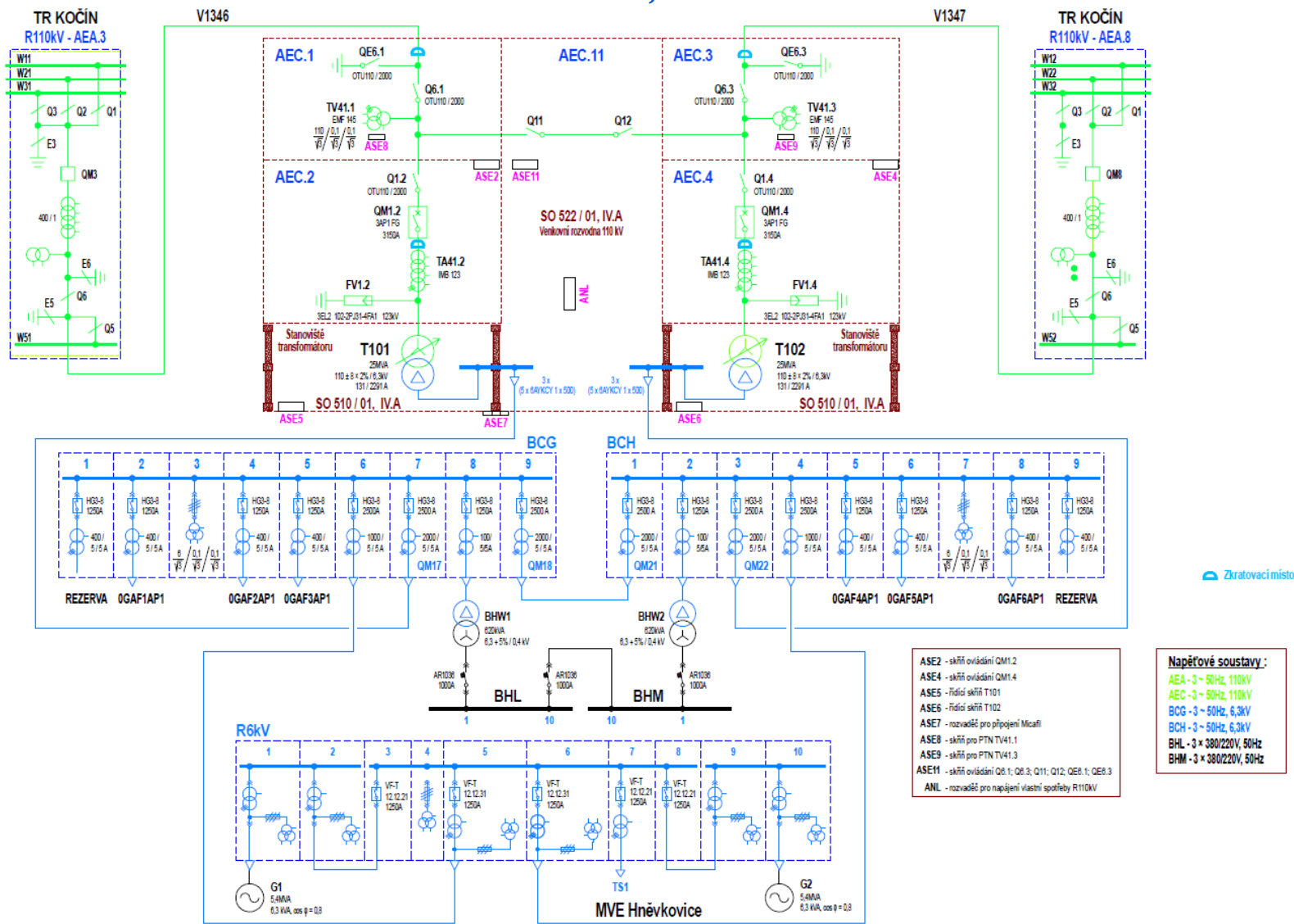
U_k	(V)	napětí nakrátko asynchronního motoru
I_k	(A)	proud nakrátko asynchronního motoru
P_k	(W)	ztráty nakrátko asynchronního motoru
R_{S20}	(Ω)	rezistance vinutí statoru asynchronního motoru při 20 °C
p_M	(—)	počet pólpárů asynchronního motoru
ϑ	(°C)	provozní teplota asynchronního motoru
R_S	(Ω)	rezistance vinutí statoru asynchronního motoru při provozní teplotě
R'_r	(Ω)	rezistance rotorového vinutí asynchronního motoru přepočteného na statorové vinutí
X_S	(Ω)	reaktance statorového vinutí asynchronního motoru
X'_r	(Ω)	reaktance statorového vinutí asynchronního motoru přepočteného na statorové vinutí
s	(—)	Skluz
Ω_{SM}	($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	úhlová synchronní rychlost motoru hlavních čerpadel
Ω_S	($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	úhlová synchronní rychlost
M	(N · m)	moment
S_{nG}	(V · A)	jmenovitý zdánlivý výkon hydrogenerátoru EHN
U_{nG}	(V)	jmenovité napětí hydrogenerátoru EHN
$\cos\varphi$	(—)	účinnost
x_d''	(—)	rázová reaktance v podélné ose
x_2	(—)	zpětná reaktance
x_0	(—)	nulová reaktance
S_{nT}	(V · A)	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
U_{nT}	(V)	jmenovité napětí transformátoru
ΔP_{kT}	(W)	jmenovité ztráty transformátoru nakrátko
p	(—)	převod transformátoru
U_{nS}	(V)	jmenovité napětí síťového napáječe
l	(m)	vzdálenost
r	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	poměrná rezistance na kilometr vedení
L	($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	poměrná indukčnost na kilometr vedení
f	(Hz)	frekvence
c	(—)	napěťový součinitel
K	(—)	impedanční korekční součinitel
$R_{(1)}$	(Ω)	Sousledná rezistance
$R_{(2)}$	(Ω)	Zpětná rezistance

$R_{(0)}$	(Ω)	netočivá rezistance
$X_{(1)}$	(Ω)	sousledná reaktance
$X_{(2)}$	(Ω)	zpětná reaktance
$X_{(0)}$	(Ω)	netočivá reaktance
$Z_{(1)}$	(Ω)	sousledná zkratová impedance
$Z_{(2)}$	(Ω)	zpětná zkratová impedance
$Z_{(0)}$	(Ω)	netočivá zkratová impedance
I_k''	(A)	počáteční souměrný rázový zkratový proud
I_{k2}''	(A)	počáteční dvoufázový rázový zkratový proud
I_{k1}''	(A)	počáteční jednofázový rázový zkratový proud
κ	(—)	součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
i_p	(A)	Nárazový zkratový proud

A.2 Seznam zkratk

ČSH	Čerpací stanice Hněvkovice
DG	Dieselgenerátor
DS	Distribuční soustava
EHN	Malé vodní elektrárna Hněvkovice
ES	Elektrizační soustava
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
EU	Evropská unie
IAEA	International Atomic Energy Agency
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale
MDG	Mobilní dieselgenerátor
MTN	Měřicí transformátor napětí
MTP	Měřicí transformátor proudu
SBO	Station blackout
SZN	System zajišťující napětí
VD	Vodní dílo

PŘÍLOHA B: PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA NAPÁJENÍ ČERPAČÍ STANICE HNĚKOVICE



Zkratovací místo

PŘÍLOHA C: REPORT Z PROGRAMU SPECSIZER

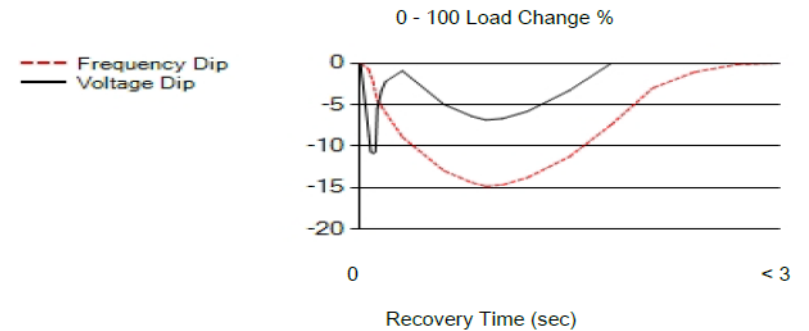
CAT		Project Sizing Report	
Sizing Id	10684750	Electricity Supply	50 Hz 400/230 V
Project Name	EHN	Connection	****
Customer Name	Ludek Zborník	Max. Ambient Temperature	25.0 C
Region	EAME/CIS	Altitude	330.0 M.A.S.L.
Prepared By	Luděk Zborník	Humidity	45%
Modified Date	9-Aug-2021		
Load Analysis Summary			
Max Transient Load Step	143.0 SkVA / 78.6 SkW		
Peak Transient Load Step	163.0 SkVA / 109.3 SkW		
Final Running Load	76.6 kVA / 62.9 kW / 0.82 PF		
Max Running Non Linear Load	12.4 RkVA		
Selection Criteria	Step 3 Voltage dip restriction		
Generator Set			
Generator Set Model	(1) of DE165E3 (C7.1)		
Model Type		Nameplate Rating	131.6 ekW / 164.5 kVA / 0.8 PF
Voltage Regulator and Slope	R180 1:1 slope;	Site Output Rating	131.6 ekW / 164.5 kVA
Feature Code	****	Rating Type	Standby
Fuel	Diesel	Open / Enclosure	Open
Sizing Methodology	Conventional		
		Capacity Used - Without Capacity Reserved	47.8%
		Capacity Used	57.4%
Engine			
Make/Model	C7.1	Emissions / Certifications	EU STAGE IIIA
Aspiration	****	Governor	ELEC

Cylinder Configuration	****	Aftercooler Type	ATAAC
Speed	RPM	Displacement	****
Engine Performance Number	****	Bore	****
Fuel Consumption at 100% Load	****	Stroke	****
Alternator			
Alternator Type/Frame Size	SR500 ¹ / M2256L4	Insulation Class	****
Alternator Winding Pitch	****	Temperature Rise	****
Excitation/Winding Type	PM / RANDOM WOUND	Number Of Poles	****
Alternator Arrangement Number	****	Number of Leads	****
Subtransient Reactance X"d	****	Rated Amps	****

**** See your Caterpillar dealer and/or Spec Sheet for technical information.

***** Package Power Tolerance: +/- 5%

Block Load(Only) Transient Response *			
Load Change %	FDip %	VDip %	Recovery Time (sec)
0 - 25	<5%	<5%	< 3
0 - 50	7.2	5.8	< 3
0 - 75	10.8	8.4	< 3
0 - 100	14.8	10.9	< 3



Transient Performance

Block Load (only) Transient Response values are at factory conditions with a resistive load. This information is representative of a typical Cat generator set, but is not guaranteed. Generator set block load capabilities at site conditions may vary from factory transient response test results due to site altitude, site ambient, and engine to engine variation.



Load Report

Project Name	EHN	Electricity Supply	50 Hz 400/230 V	
Customer Name	Ludek Zborník	Rating Type	Standby	
Region	EAME/CIS	Max. Ambient Temperature	25.0 C	
Prepared By	Luděk Zborník	Altitude	330.0 M.A.S.L.	
Modified Date	9-Aug-2021	Humidity	45%	
Generator Set Model	(1) of DE165E3 (C7.1)	Nameplate Rating	131.6 ekW / 164.5 kVA / 0.8 PF	

Load Details		Permitted		Predicted		Transient Inrush		Running		Resultant Peak		Cumulative Running	
Load Step	Load Description	FDip	VDip	FDip	VDip	SkVA	SkW	kVA	kW	SkVA	SkW	kVA	kW
Step 1													
1.1	40x0.03 kW - Zářivky: Fluorescent Lighting, Line 1-3	10%	15%			1.6	1.2	1.3	1.2				
1.2	4x1.00 kW - Topné tělesa generátoru: Resistive, Line 1-2	10%	15%			4.0	4.0	4.0	4.0				
1.3	1x10.30 kVA - Usměňovač : Battery Charger, 3-Phase, 6 Pulse	10%	15%			10.3	9.3	10.3	9.3				
Step 1 Total		10%	15%	<5%	<5%	17.2	14.5	17.2	14.5				
Total Through Step 1										17.2	14.5	17.2	14.5
Step 2													
2.1	2x0.25 kW - Čerpadlo prosáklé vody turbíny: IEC, Centrifugal Pump, Direct On Line, Loaded, Single	10%	15%			7.2	6.2	1.0	0.7				
2.2	2x1.10 kW - Čerpadlo prosáklého oleje turbíny: IEC, Centrifugal Pump, Direct On Line, Loaded, Single	10%	15%			19.0	14.6	3.8	2.8				
Step 2 Total		10%	15%	<5%	<5%	26.1	20.8	4.8	3.5				
Total Through Step 2										43.2	35.3	21.9	18.0
Step 3													
3.1	1x15.00 kW - Čerpadlo čerpacího agregátu rychlouzávěru: IEC, Centrifugal Pump, Direct On	10%	15%			143.0	78.7	20.1	16.9				
Step 3 Total		10%	15%	8.5%	11.1%	143.0	78.6	20.1	16.9				
Total Through Step 3										163.0	96.6	41.9	34.8
Step 4													

4.1	1x0.75 kW - Čerpadlo filtrační jednotky čerpacího agregátu: IEC, Centrifugal Pump, Direct On Line,	10%	15%			6.9	5.5	1.4	1.0				
4.2	1x11.00 kW - Čerpadlo čerpacího agregátu regulátoru: IEC, Centrifugal Pump, Direct On Line,	10%	15%			103.0	58.7	14.9	12.4				
Step 4 Total		10%	15%	7.0%	8.8%	109.6	64.2	16.3	13.4				
Total Through Step 4										149.2	99.1	58.2	48.2
Step 5													
5.1	1x4.00 kW - Kompresor čerpacího agregátu regulátoru: IEC, 3-Phase Motor, Direct On Line,	10%	15%			41.4	27.3	5.9	4.7				
5.2	1x5.50 kW - Čerpadlo systému hladící vody: IEC, Centrifugal Pump, Direct On Line, Loaded, Single	10%	15%			53.5	33.7	7.9	6.4				
Step 5 Total		10%	15%	6.6%	7.7%	94.9	61.0	13.8	11.1				
Total Through Step 5										151.4	109.3	72.0	59.3
Step 6													
6.1	1x3.00 kW - Čerpadlo hydrostatického mazání závěsného ložiska: IEC, Centrifugal Pump, Direct	10%	15%			29.7	20.2	4.6	3.6				
Step 6 Total		10%	15%	<5%	<5%	29.7	20.2	4.6	3.6				
Total Through Step 6										101.0	79.6	76.6	62.9
Load Analysis Summary : Generator set meets site requirements													
						Maximum Step				Maximum Peak		Final Running	
						SkVA	SkW			SkVA	SkW	kVA	kW
						143.0	78.6			163.0	109.3	76.6	62.9

PŘÍLOHA D: PARAMETRY NAVRŽENÝCH VYSOKONAPĚŤOVÝCH MĚNIČŮ

Typ měniče	Výkon měniče	Usměrňovač	Zdroj vstupního napětí	Počet přívodních kabelů	Výstupní filtr	Chlazení	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Hmotnost [kg]	Účinnost	Hlučnost	Zkreslení výstupního napětí
ACS 580MV	3550 kW	Diodový 30 pulzní	Integrovaný transformátor	3	NE	Vzduch	6 230	1 376	2 571	10 300	0,967	<85 dB	<2 %
ACS 2000	3200 kW	Diodový 24 pulzní	Externí transformátor	12	ANO	Vzduch	2 342	1 200	2 652	2 342	0,98	<85 dB	
ACS 2000	3200 kW	Diodový 24 pulzní	Integrovaný transformátor	3	ANO	Vzduch	5 100	1 200	2 652	8 800	0,985	<85 dB	
ATV 6000	5320 kVA	Diodový 30 pulzní	Integrovaný transformátor	3	NE	Vzduch	5 960	1700	2 795	12 522	0,965	<83 dB	<2 %

PŘÍLOHA E: PŘEHLED PARAMETRŮ OCHRAN V ČERPACÍ STANICI HNĚVKOVICE A MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNĚ HNĚVKOVICE

Místo	Typ	Ochranná funkce	Název	Parametry	Napájení ze sítě	Jednotka
Hydrogenerátor EHN	Siemens 7UM6235	F11 - Nadproudová zkratová	Proud	I>>	1500	A
			Časové zpoždění	TI>>	0,3	s
				I>>DIR	3000	A
				I>>DIR	0,1	s
		F13 - Nadproudové přetížení	Proud	I>	650	A
			Časové zpoždění	TI>	0,8	s
		F361 - Napěťová hlavní	Nadpěťová 1. stupeň	U>	6,9	kV
			Časové zpoždění 1. stupeň	T _U >	3	s
			Nadpěťová 2. stupeň	U>>	7,8	kV
			Časové zpoždění 2. stupeň	T _U >>	0	s
		F362 - Napěťová záložní	Nadpěťová 1. stupeň	U>	7,3	kV
			Časové zpoždění 1. stupeň	T _U >	3	s
			Nadpěťová 2. stupeň	U>>	8,2	kV
			Časové zpoždění 2. stupeň	T _U >>	0	s
		F39 - Podfrekvenční	Podfrekvenční 1. stupeň	f<	47	Hz
			Časové zpoždění 1. stupeň	T _F <	3	s
Podfrekvenční 2. stupeň	f<<		46	Hz		
Časové zpoždění 2. stupeň	T _F <<		1	s		

Místo	Typ	Ochranná funkce	Název	Parametry	Napájení ze sítě	Jednotka
Ochrany kabelového vývodu R6kV na ČSH	7SJ640	F112 - Nadproudové přetížení	Charakteristika		DT	
			Primární proud	I>	1400	A
			Časové zpoždění	T ₁ >	0,6	s
		F111 - Nadproudová zkratová	Primární proud	I>>	4000	A
			Časové zpoždění	T ₁ >>	0,05	s
		F12 - Směrová nadproudová ochrana	Charakteristika		DT	
			Primární proud	I>DIR	1400	A
			Časové zpoždění	T ₁ >DIR	0,45	s
		F391 - Podfrekvenční	Úhel	α	45	
			Podfrekvenční	f<	47,5	Hz
F391 - Nadfrekvenční	Časové zpoždění	T _F <	1	s		
	Nadfrekvenční	f>	51,5	Hz		
Čerpadlo surové vody	M205	F111 - Nadproudová zkratová	Časové zpoždění	T _F >	1	s
			Referenční proud ochrany	I _E	(0,8I _n)/280	A
			Charakteristika		DT	
		F112 - Kontrola rozběhu pohonu	Primární proud	I>>	(10.I _E)/2800	A
			Časové zpoždění	T>>	0,06	s
			Primární proud	I>.c	(1,68.I _E)/470	
			Časové zpoždění	T>	6	s
		F113 - Ochrana při nesymetrická zátěži motoru	Proud	I>	1,6.I _E	A
			Koeficient nadproudového členu	c	1,05	-
			Charakteristika		DT	
F113 - Ochrana při nesymetrická zátěži motoru	Proud náběhu	I ₂ >	(0,15.I _E)/42	A		
	Zpoždění náběhu	T ₂ >	4	s		

Místo	Typ	Ochranná funkce	Název	Parametry	Napájení ze sítě	Jednotka
Čerpadlo surové vody	M205	F63 - Tepelné přetížení motoru	Charakteristika		MPTTR	
			Vypínací úroveň oteplení	ϑ	170	%
			Signalizační úroveň	ϑ_s	(0,9.9).153%	%
			Počáteční úroveň oteplení	$\vartheta_{poč}$	53	%
			První časová konstanta	τ_1	15	min
			Druhá časová konstanta	τ_2	20	min
Vývod na EHN	AT31X	F111 - Nadproudová zkratová	Charakteristika		DT	
			Primární proud	I>>	10000	A
			Časové zpoždění	T>>	0	s
	A11	F112 - Nadproudová zkratová ochrana	Charakteristika		DT	
			Primární proud	I>>	1460	A
			Časové zpoždění	T>>	0,6	s