



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Doprava

Ministerstvo dopravy
Státní fond dopravní
infrastruktury



			ČÍSLO SOUPRAVY:
		PO PŘIPOMÍNKOVÉM ŘÍZENÍ	
REVIZE Č.	DATUM	ZMĚNA	



Olšanská 1a
130 80 Praha 3
Česká republika
tel.: +420 267 094 305
IDDS: gj4w9x7
e-mail : info@sudopeu.cz




Olšanská 1a
130 80 Praha 3
Česká republika
tel.: +420 267 094 111
IDDS: nd9sqfy
e-mail : praha@sudop.cz



MORAVIA CONSULT Olomouc a.s.
LEGIONÁŘSKÁ 1085/8 , 779 00 Olomouc

tel.: +420 585 570 444
IDS: kjee9md
e-mail: moravia@moravia.cz
http://www.moravia.cz

OBJEDNATEL	 Správa železniční dopravní cesty	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace v zastoupení: SŽDC, s.o., Stavební správa východ, Nerudova 1, 772 58 Olomouc	
HLAVNÍ INŽENÝR PROJEKTU	ING. PETR JEMELKA	G. ŘEDITEL MORAVIA CONSULT Olomouc a.s. ING. VÁCLAV KRATOCHVÍL	
ODPOVĚDNÝ PROJ. OBJ., PS	ING. JIŘÍ HAJZL	KONTRÓLOVAL ING. MARTIN MNOŽIL	
KRAJ: OLOMOUCKÝ	POVĚŘENÝ OÚ:	OBEC:	
"Elektrizace a zkapacitnění trati Libina - Uničov"		ZAK. ČÍSLO MCO	17-106-232-PS
		ÚČEL	DSP
		DATUM	ÚNOR 2019
		FORMÁT	A4
		MĚŘÍTKO	-
Výpočty zpětných vlivů TM na LDSž 22kV		ČÁST B.16.1	POŘ.Č.

ZPRACOVATEL

Ing. Jiří Hajzl, náměstí Míru 187, 538 03 Heřmanův Městec – IČ: 74630946
odborné poradenství v elektrické trakci a EMC
+420 777 901 961 - posta@jirihajzl.cz - http://www.jirihajzl.cz

ZÁKAZNÍK

MORAVIA CONSULT Olomouc a.s., Legionářská 1085/8, 779 00 Olomouc – IČ: 64610357

ODBORNÁ STUDIE

napět'ové poměry na kabelovém rozvodu 22 kV v úseku Šumperk – Libina – Uničov – Olomouc (část Libina - Uničov) č. Z18004

SPECIFIKACE

Tato studie prezentuje výsledky analýzy předpokládaných úrovní harmonického zkreslení napětí na hladině 22 kV napájecích stanic rozvodu 22 kV způsobených provozem TU, výpočtového určení / ověření hodnot kompenzačních tlumivek pro kompenzaci kapacitního charakteru kabelů 22 kV.

Tato studie byla vypracována pro společnost MORAVIA CONSULT Olomouc a.s., jakožto dodavatele dokumentace stavby (staveb), pro potřeby určení možného vzájemného negativního ovlivnění jednotlivých částí stavby / staveb (kabelový rozvod 22 kV, odběry v tohoto rozvodu, TM,...) a případné plánování nápravných či preventivních opatření.

Tato studie zahrnuje s ohledem na nezbytné souvztažnosti a technickou i provozní provázanost též výpočty a analýzy souvisejících staveb.

Identifikace stavby u zákazníka:

- akce: (17-106-232-PS-K17) Elektrizace a zkapacitnění trati Libina – Uničov

Související stavby:

- akce: (17-107-232-PS-K18) Elektrizace a zkapacitnění trati Šumperk – Libina (mimo)
- akce: (17-105-235-PS-K23) Elektrizace a zkapacitnění trati Uničov (včetně) - Olomouc

VYHODNOCENÍ / ZÁVĚR

V textu

PROTOKOL

Datum vydání:
11.11.2018

Autorizace:


Ing. Jiří HAJZL
nám. Míru 187, 538 03 Heřmanův Městec
(+420) 777 901 961 – posta@jirihajzl.cz
IČ: 746 30 946

Počet stran:	16
Počet příloh:	2
Počet výtisků:	7+ev
Číslo výtisku:	ev

POZNÁMKY

1 OBSAH

1	Obsah.....	2
2	Cíl studie	3
3	Použitá dokumentace.....	3
4	Popis rozsahu řešených staveb	3
5	Vstupní údaje a požadavky	4
5.1	Distribuční síť – R 110 kV Uničov (plánovaná rozvodna ČEZdi)	4
5.2	Distribuční síť – R 110 kV Uničovské strojírny	4
5.3	Distribuční síť – R 110 kV Šternberk	4
5.4	Distribuční síť – R 110 kV Šumperk	4
5.5	Kabelová vedení	4
5.6	Oddělovací transformátory	4
6	Hodnoty kompenzačních tlumivek pro kompenzaci kapacity kabelů 22 kV	5
6.1	Podmínky platnosti výpočtu	5
6.2	Výsledky	6
7	NAVÝŠENÍ HARMONICKÝCH NAPĚTÍ NA KABELECH 22 KV	7
7.1	Podmínky platnosti výpočtu	7
7.2	Výsledky	8
7.3	Analýza výsledků a zhodnocení	12
8	Úrovně harmonického zkreslení napětí na hladině 22 kV TNS	13
8.1	Podmínky platnosti výpočtu	13
8.2	Výsledky	14
8.3	Analýza výsledků a zhodnocení	14
9	Ovlivnění napětí na hladině nn (3*230/400 V)	15
9.1	Zdroje ovlivnění	15
9.2	Možnosti snížení negativních vlivů	15
9.2.1	Zkreslení z napájecí sítě 22 kV ČEZdi.....	15
9.2.2	Zkreslení provozem TU v TNS.....	15
9.2.3	Zkreslení provozem zařízení na hladině nn	15
10	Prohlášení zhotovitele.....	16

2 CÍL STUDIE

Studie je vypracována pro potřeby elektrizace a zkapacitnění trati Libina – Uničov a navázání na související stavby. Jejím cílem je

- analýza předpokládaných úrovní harmonického zkreslení napětí na hladině 22 kV napájecích stanic rozvodu 22 kV způsobených provozem TU,
- výpočtové určení / ověření hodnot kompenzačních tlumivek pro kompenzaci kapacitního charakteru kabelů 22 kV.

Tato studie byla vypracována pro společnost MORAVIA CONSULT Olomouc a.s., jakožto dodavatele dokumentace stavby, pro potřeby určení možného vzájemného negativního ovlivnění jednotlivých částí stavby / staveb (kabelový rozvod 22 kV, odběry v tohoto rozvodu, TM,...) a případné plánování nápravných či preventivních opatření.

Tato studie zahrnuje s ohledem na nezbytné souvztažnosti a technickou i provozní provázanost též výpočty a analýzy souvisejících staveb.

3 POUŽITÁ DOKUMENTACE

- [1] *Projektová dokumentace MCO, Přehledové schéma napájení LDS 22 kV*
- [2] *Vyjádření ČEZdi ke zkratovým poměrům, p. Petr Feber, 04.06.2018*
- [3] *Typový list kabelu AXCES 3x95/25 12/20(24) kV, ENSLO*
- [4] *Typový list kabelu AXCES 3*95/25 12/20(24) kV, Ericsson*
- [5] *SŽDC TKP33:2016 - Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah, kapitola 33 – Elektromagnetická kompatibilita, třetí aktualizované vydání – změna 10, SŽDC s.o., účinnost od 01.11.2016.*
- [6] *ČSN EN 50160 ed.3 - Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*
- [7] *PNE 33 3430-0 - Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*

4 POPIS ROZSAHU ŘEŠENÝCH STAVEB

Soubor staveb „Elektrizace a zkapacitnění“ pro traťový úsek Šumperk – Libina – Uničov - Olomouc zahrnují jak úpravy kolejového řešení stávající trati mezi žst. Šumperk a žst. Uničov, tak i její elektrizaci, doplnění trakčního napájení a osazení a zprovoznění magistralního kabelového rozvodu 22 kV pro napájení drážních, a v omezených případech i nedrážních odběrů.

Soubor staveb zahrnuje dílčí stavby:

- Elektrizace a zkapacitnění trati Šumperk – Libina (mimo)
- Elektrizace a zkapacitnění trati Libina – Uničov
- Elektrizace a zkapacitnění trati Uničov (včetně) - Olomouc

Rozvod 22 kV je plánován jako rozvod napájený z hladiny 22 kV TNS Šumperk, TNS Uničov a TNS Šternberk řešený závěsným kabelovým vedením zasmyčkováným do vybraných staničních trafostanic. V těchto trafostanicích budou osazeny rozvaděče 22 kV pro umožnění operativního přepínání napájení a zajištění napájení 1. kategorie pro kritické odběry, transformátory 22/0,4 kV pro napájení odběrů na hladině nn a kompenzační prvky pro kompenzaci kapacitního charakteru kabelových vedení 22 kV. Odběrové charakteristiky odběrů na hladině nn budou řešeny a kompenzovány přímo na této hladině.

5 VSTUPNÍ ÚDAJE A POŽADAVKY

5.1 Distribuční síť – R 110 kV Uničov (plánovaná rozvodna ČEZdi)

napěťová hladina DS:	$U_n =$	110.000 V
zkratové výkony pro R 110 kV Uničov (2026):	$I_{ks3max} =$	6,05 kA
(následující údaje pro hladinu 22 kV jsou s ohledem na totožné zkratové parametry hladiny VVN převzaty z původního vyjádření ČEZdi k předchozímu stupni – viz též studie Z16006)		
napěťová hladina DS:	$U_n =$	22.000 V
zkratové výkony pro R 22 kV Uničov (T 25 MVA, uk = 11,1 %):	$I_{ks3max} =$	5,05 kA
	$I_{ks3min} =$	4,07 kA
zkratové výkony pro R 22 kV Uničov (T 40 MVA, uk = 12,5 %):	$I_{ks3max} =$	6,62 kA
	$I_{ks3min} =$	5,05 kA
zkratové výkony pro R 22 kV Uničov (T 50 MVA, uk = 13,5 %):	$I_{ks3max} =$	7,40 kA
	$I_{ks3min} =$	5,47 kA

5.2 Distribuční síť – R 110 kV Uničovské strojírny

napěťová hladina DS:	$U_n =$	110.000 V
zkratové výkony pro R 110 kV Uničovské strojírny (2018):	$I_{ks3max} =$	5,16 kA
	$I_{ks3min} =$	2,44 kA
napěťová hladina DS (pro T 110/22 kV, 25 MVA, uk = 11,1%):	$U_n =$	22.000 V
zkratové výkony pro R 22 kV Uničovské strojírny (2018):	$I_{ks3max} =$	4,81 kA
	$I_{ks3min} =$	3,98 kA

5.3 Distribuční síť – R 110 kV Šternberk

napěťová hladina DS:	$U_n =$	110.000 V
zkratové výkony pro R 110 kV Šternberk (2026):	$I_{ks3max} =$	7,74 kA
zkratové výkony pro R 110 kV Šternberk (2018):	$I_{ks3max} =$	4,38 kA
	$I_{ks3min} =$	2,14 kA
napěťová hladina DS (pro T 110/22 kV, 25 MVA, uk = 11,1%):	$U_n =$	22.000 V
zkratové výkony pro R 22 kV Šternberk (2026):	$I_{ks3max} =$	5,13 kA
zkratové výkony pro R 22 kV Šternberk (2018):	$I_{ks3max} =$	4,65 kA
	$I_{ks3min} =$	3,81 kA

5.4 Distribuční síť – R 110 kV Šumperk

napěťová hladina DS:	$U_n =$	110.000 V
zkratové výkony pro R 110 kV Šumperk (2026):	$I_{ks3max} =$	13,32 kA
zkratové výkony pro R 110 kV Šumperk (2018):	$I_{ks3max} =$	9,23 kA
	$I_{ks3min} =$	4,08 kA
napěťová hladina DS (pro T 110/22 kV, 25 MVA, uk = 11,1%):	$U_n =$	22.000 V
zkratové výkony pro R 22 kV Šumperk (2026):	$I_{ks3max} =$	5,43 kA
zkratové výkony pro R 22 kV Šumperk (2018):	$I_{ks3max} =$	5,24 kA
	$I_{ks3min} =$	4,58 kA

5.5 Kabelová vedení

počet kabelů:	$n =$	1
typ kabelů:	AXCES 3x95/25 12/20(24) kV	
průřez vodiče / stínění:	3x 95 / 25 mm ²	
kapacitance:	$c =$	0,250 μF/km
indukčnost:	$l =$	0,320 mH/km
odpor:	$r =$	0,320 Ω/km

5.6 Oddělovací transformátory

transformátor TSN (10 MVA)

převod:	23 / 23 kV	
jmenovitý výkon:	$S_n =$	10 MVA
napětí nakrátko:	$U_k =$	8 %

6 HODNOTY KOMPENZAČNÍCH TLUMIVEK PRO KOMPENZACI KAPACITY KABELŮ 22 KV

Jedním ze základních parametrů kabelových i vzdušných vedení je jejich příčná kapacita daná obvykle parametry použitého kabelu (resp. parametry vzdušného vedení). Tato kapacita je měrným parametrem vztaženým k jednotkové délce a v případě kabelů je přímo uváděna výrobcem kabelu v jeho technickém listu. S prodlužující se délkou vedení roste celková kapacita kabelu z pohledu místa jeho připojení a tím i dodávka induktivního jalového výkonu (obvykle též stále označovaný jako nevyžádaná kapacitní práce či kapacitní odběr), která se projeví zejména při poklesu činné zátěže. V závislosti na napěťové hladině, délce kabelu a místě jeho připojení může dosahovat kapacitní odběr takových hodnot, že v případě odlehčení vlastní či paralelní zátěže (např. TM) dojde až k překlopení celého přípojného místa do kapacitního charakteru odběru. Tyto vlivy výrazně rostou s provozním napětím rozvodu a jeho délkou.

Kritickým stavem v tomto případě je okamžik, kdy je vedení pod napětím avšak nejsou z něj realizovány žádné odběry, resp. tyto odběry jsou vykompenzovány nebo mají pouze malý induktivní charakter. V takovém případě se projeví kapacita kabelu, jak bylo uvedeno výše. Kompenzace kapacitního charakteru se realizuje prostým paralelním trvalým připojením induktivní zátěže (třífázové tlumivky) s odpovídajícím jalovým výkonem. Je přitom nepodstatné, zda je instalace provedena přímo na VN úrovni či na NN úrovni za transformací.

Podstatným je však způsob instalace. Kompenzována musí být, pro dosažení optimálních výsledků, každá samostatně odpojitelná část rozvodu tak, aby byla vždy provozována se sobě příslušnou kompenzační tlumivkou. Jedině tak lze zajistit ve všech provozních stavech odpovídající kompenzaci.

6.1 Podmínky platnosti výpočtu

- parametry kabelového rozvodu 22 kV dle poskytnutých údajů (viz výše).
-

6.2 Výsledky

Hodnoty kapacitního výkonu jednotlivých úseků jsou uvedeny v **příloze 1**. Plánované hodnoty kompenzačních tlumivek jsou uvedeny v následující tabulce:

Úsek	I [km]	QC [kvar]	QL [kvar]
TNS Šumperk			215,00
TNS Šumperk - žst. Nový Malín	4,580	174,10	
žst. Nový Malín			200,00
žst. Nový Malín - TMP Hrabšíň	5,560	211,35	
TMP Hrabšíň			200,00
TMP Hrabšíň - žst. Libina	4,590	174,48	
žst. Libina			200,00
žst. Libina - zast. Nová Hradečná	5,730	217,82	
zast. Nová Hradečná			0,00
zast. Nová Hradečná - žst. Troubelice	4,150	157,76	
žst. Troubelice			200,00
žst. Troubelice - TNS Uničov	4,230	160,80	
TNS Uničov			415,00
TNS Uničov - žst. Uničov	0,280	10,64	
žst. Uničov			0,00
žst. Uničov - zast. Uničov	2,000	76,03	
zast. Uničov			100,00
zast. Uničov - žst. Újezd u Uničova	3,430	130,39	
žst. Újezd u Uničova			200,00
bilance pro část rozvodu		1313,36	1730,00
Úsek	I [km]	QC [kvar]	QL [kvar]
žst. Šternberk			0,00
žst. Šternberk - TNS Šternberk	0,570	21,67	
TNS Šternberk			200,00
TNS Šternberk - žst. Bohuňovice	6,350	241,38	
žst. Bohuňovice			100,00
žst. Bohuňovice - TMP Olomouc	6,730	255,83	
TMP Olomouc			200,00
bilance pro část rozvodu		518,88	500,00

Jak vyplývá z výše uvedeného, pro úsek LDSŽ mezi TNS Šumperk a žst. Újezd u Uničova je vypočtený kapacitní výkon kabelového vedení menší než je souhrn hodnot navrhovaných kompenzačních tlumivek v této části rozvodu instalovaných.

Pro úsek LDSŽ mezi žst. Šternberk a TMP Olomouc vychází sice vypočtený kapacitní výkon větší než souhrn hodnot navrhovaných kompenzačních tlumivek v této části rozvodu instalovaných. Tento kompenzační nedostatek je pouze na úrovni cca 19 kvar, což je s ohledem na přítomnost 2 trakčních napájecích stanic (TNS Šternberk, TMP Olomouc) zanedbatelná hodnota, která bude zřejmě bez větších problémů kompenzována běžným provozem LDSŽ.

7 NAVÝŠENÍ HARMONICKÝCH NAPĚTÍ NA KABELECH 22 KV

Jelikož při napájení kabelových vedení přes oddělovací transformátor dochází ke vzniku sériového rezonančního obvodu, tvořeného oddělovacím transformátorem 22/22 kV (indukčnost) a kapacitou kabelového vedení, je třeba důsledně sledovat a vyhodnocovat rezonanční charakteristiky této kombinace resp. všech variant, ke kterým může při provozu dojít.

Situace je kritickou zejména v případech, kdy napájecí napětí tohoto rozvodu (na primární strana oddělovacího transformátoru) je již zkresleno a obsahuje harmonické či neharmonické složky. Pokud by rezonanční kmitočet LC členu (tvořeného transformátorem a kabelovým vedením), byl blízký nebo roven některé ze složek, fungoval by tento LC člen jako filtrační člen a „odsával“ danou složku z napájecího napětí – sběrný 22 kV TNS.

Výše uvedený stav je rizikový, neboť prvky na toto nejsou určeny a dimenzovány. Zásadním problémem by potom bylo významné navýšení hodnoty napětí dotčené harmonické složky na kabelovém vedení. Sériový LC člen sice vykazuje na rezonančním kmitočtu nízkou (takřka nulovou) hodnotu impedance, avšak s ohledem na elektrické charakteristiky prvků vykazují dílčí napětí prvků vysoké až kritické napěťové hodnoty „rezonující“ složky. Tato je však na nich v protifázi, protože i výsledná impedance LC členu jako celku je blízká nule.

V reálné provozu, jak již bylo uvedeno výše, je C-prvkem LC členu kabelové vedení, takže při výrazném navýšení „rezonující“ harmonické dojde ke zkreslení základní harmonické touto složkou. Z praxe jsou přitom známy případy, kdy zkreslující složka dosahuje více než 50 % hodnoty základní harmonické. Nejenže tak dojde k nepřipustnému zkreslení napětí v rozvodu a připojených sítích NN, ale též dojde k významnému navýšení vrcholových i efektivních hodnot napětí v rozvodu. V důsledku potom může dojít k poškození kabelového vedení i připojených zařízení tímto vzniklým přepětím.

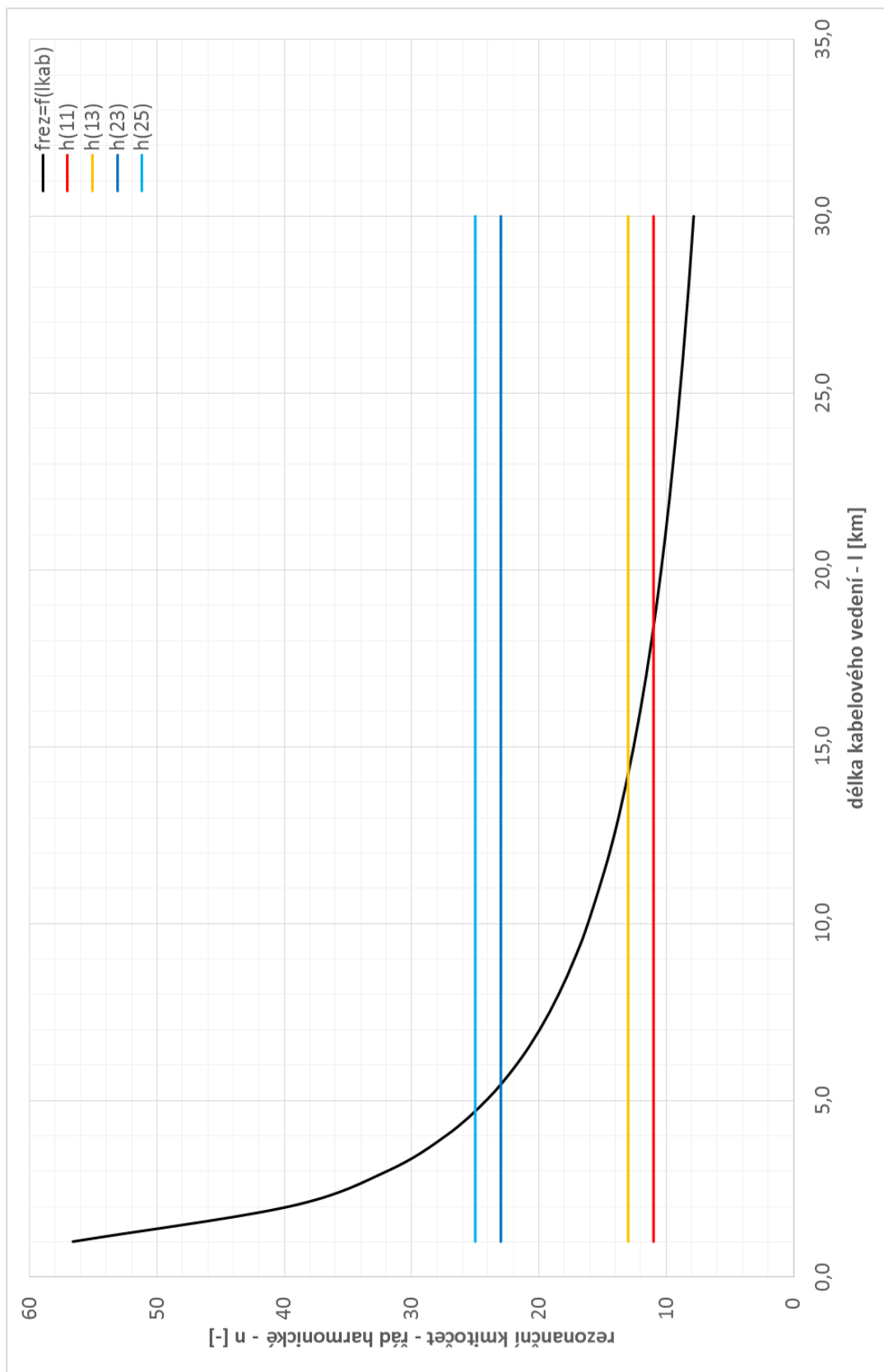
Na sběrně 22 kV v TNS, kde budou připojeny rozvody 22 kV, je vlivem provozu trakčního usměrňovače zkreslený časový průběh napětí. Toto zkreslení je následkem funkce trakčního usměrňovače, který se z pohledu strany 22 kV jeví jako proudový generátor lichých harmonických řádů 11, 13, 23, 25 atd. Tyto proudové harmonické na vstupní impedanci sítě 22 kV způsobují podle Ohmova zákona napěťové harmonické stejných řádů. Hodnoty napěťových harmonických, dle provedených rozborů, splňují mezní podmínky dané ČSN EN 50160 ed.3.

7.1 Podmínky platnosti výpočtu

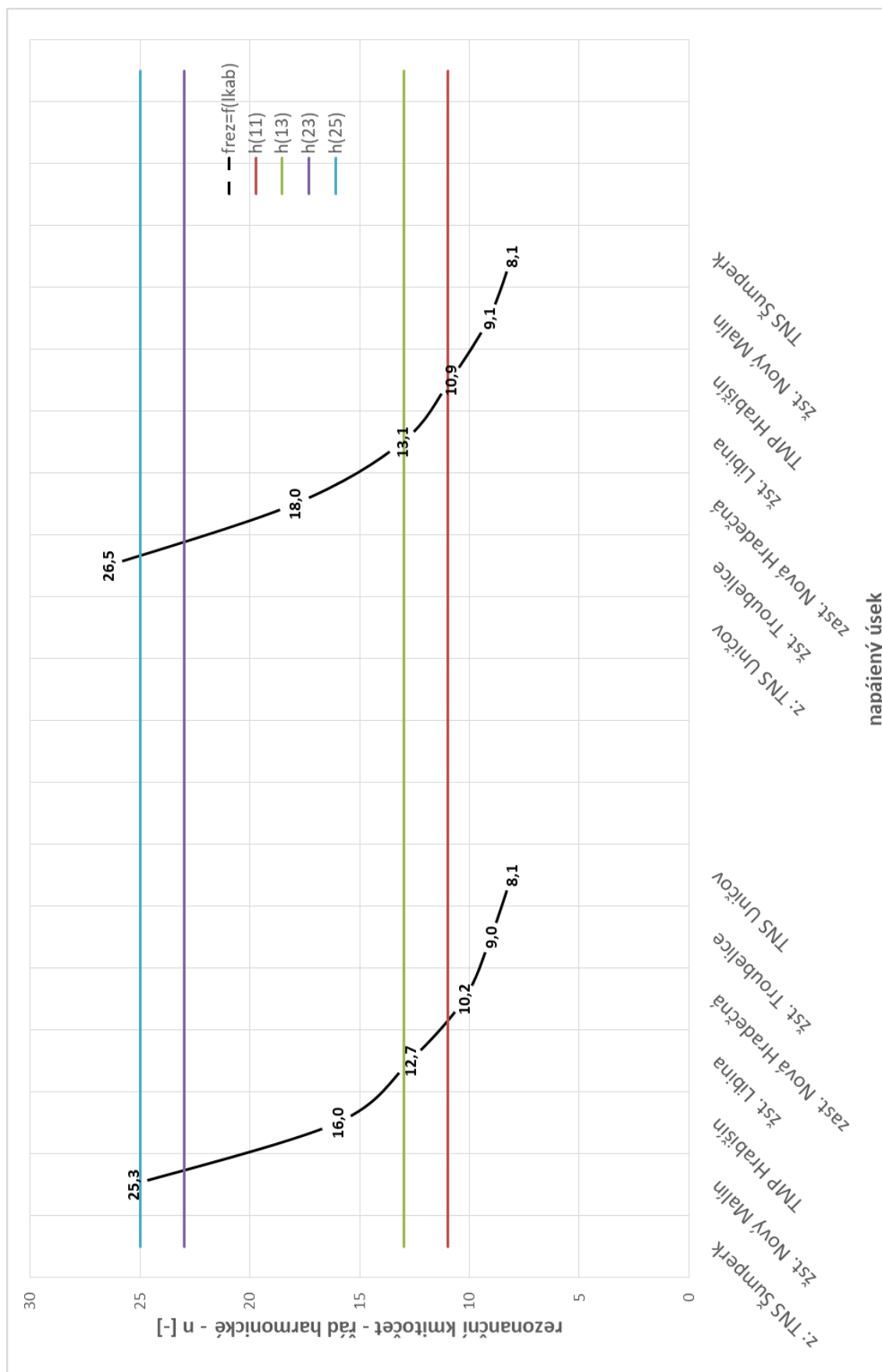
- parametry kabelového rozvodu 22 kV dle poskytnutých údajů (viz výše).
- hodnocení pouze harmonických průkazně generovaných TM

7.2 Výsledky

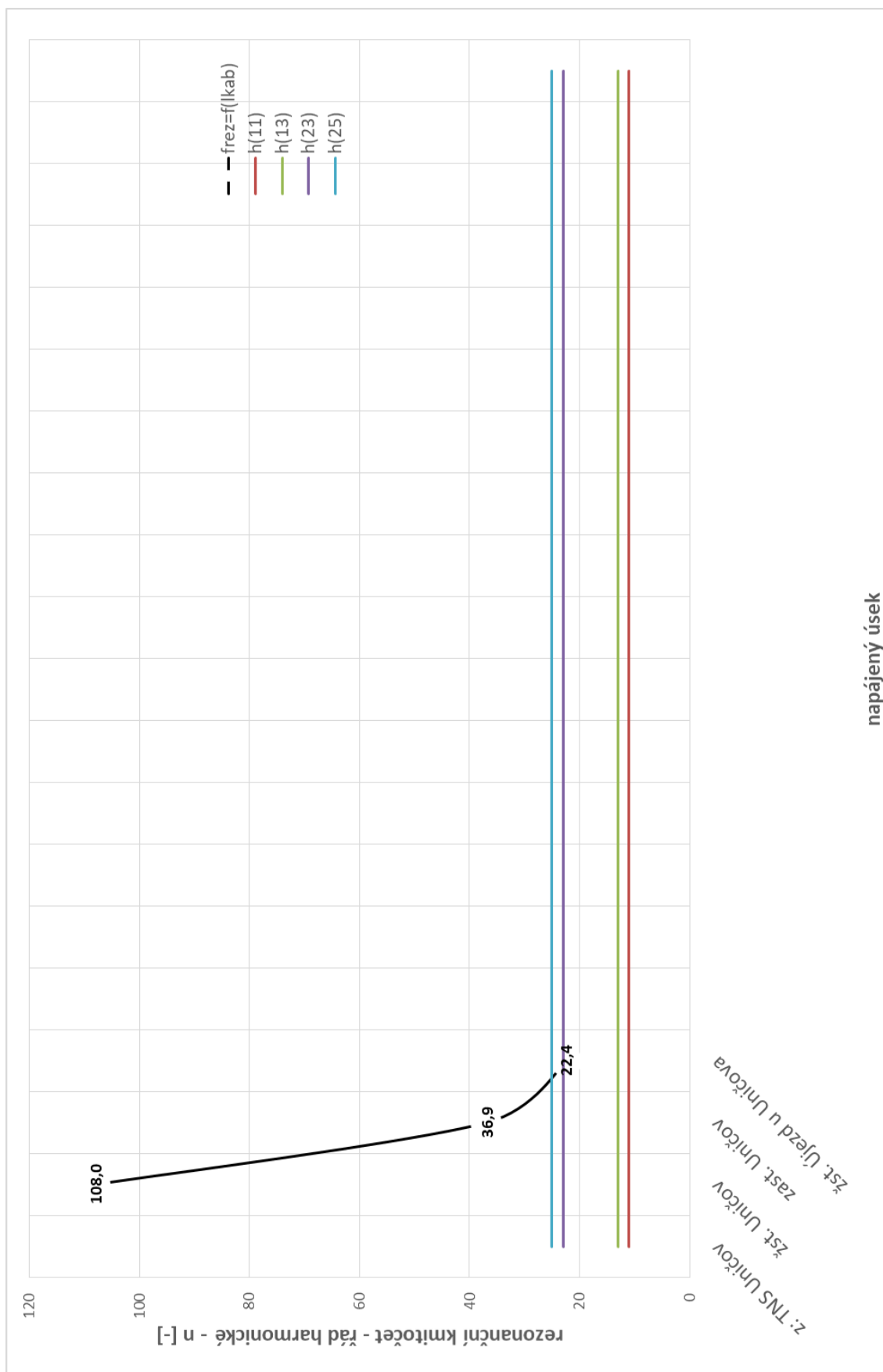
Při napájení kabelového vedení prostřednictvím oddělovacího transformátoru o výkonu 10 MVA dochází k poklesu rezonanční frekvence rozvodu s narůstající délkou dle následujícího grafu (včetně vyznačení kritických harmonických):



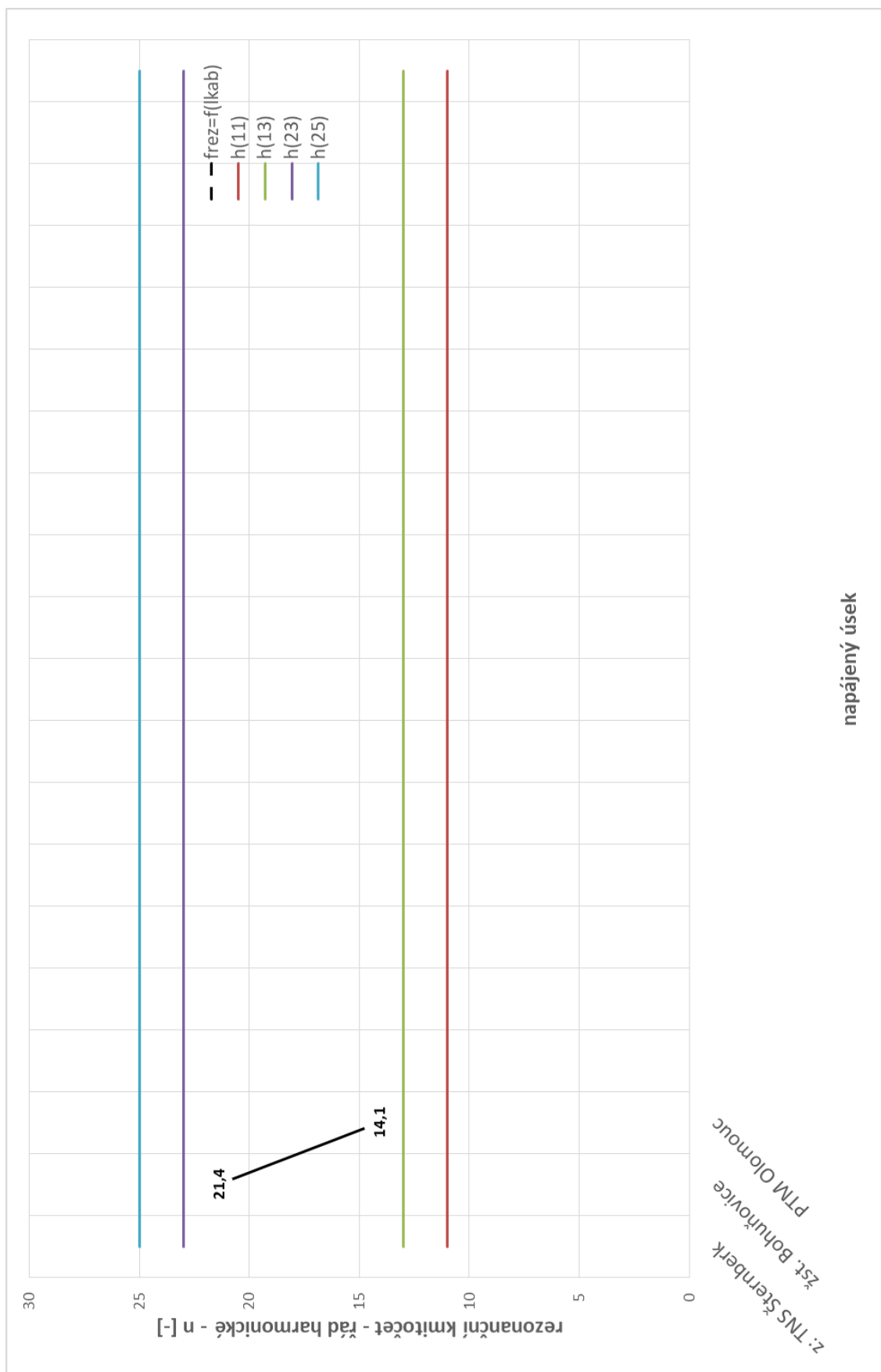
Aplikace pro napájení reálného úseku mezi TNS Šumperk a TNS Uničov je uvedena níže.



Aplikace pro napájení reálného úseku mezi TNS Uničov a žst. Újezd u Uničova je uvedena níže.



Aplikace pro napájení reálného úseku mezi TNS Šternberk a TMP Olomouc je uvedena níže.



7.3 Analýza výsledků a zhodnocení

Jak vyplývá z výše uvedených grafů, ani v jednom případě nenastane tzv. optimální varianta, kdy již v základním stavu, tj. při napájení nejkratšího možného úseku, by rezonanční kmitočet rozvodu byl pod nejnižším ohrožujícím kmitočtem. V takovém případě by nebylo třeba přijímat žádná opatření, neboť s každým dalším prodloužením napájeného úseku dochází k nárůstu kapacity kabelu (a tedy i LC členu) a snížení rezonančního kmitočtu.

S ohledem na napěťovou hladinu rozvodu však není reálné nasazovat standardně tzv. rozlaďovací členy, které by toto snížení kmitočtu zajistily pomocí přídavné kapacity (kondenzátoru) a doplněním tlumivky (pro hrazení kapacitního vlivu kondenzátoru). V případech rozvodu 22 kV, primárních rezonančních kmitočtech nejkratšího úseku na úrovni cca 24. harmonické a potřebě snížení pod 11. harmonickou, tj. typicky minimálně na 10. harmonickou, vychází tyto rozlaďovací členy s parametry:

- kondenzátor třífázový 22 kV: 3x 6 μ F (odděl. transformátor 10 MVA)
- tlumivka třífázová 22 kV: 912 kvar (odděl. transformátor 10 MVA)

Tyto rozlaďovací členy by však musely být osazeny na všech „zdrojových“ stanicích na hladině 22 kV za oddělovacím transformátorem a musely by být připojeny trvale.

Náhradním řešením, které však nese náročnost jak z hlediska provozních omezení, ovládání tak i pro obsluhu je vyloučení určitých provozních kombinací či omezené osazení rozlaďovacího členu.

Pro úsek Šumperk – Uničov vychází zásadně negativně všechny napájené úseky z TNS Šumperk po žst. Nový Malín a po žst. Libina a z TNS Uničov po žst. Libina a TMP Hrabšíň.

Ve všech výše uvedených případech doporučuje zhotovitel z provozního hlediska pouze organizačně zamezit napájení těchto krátkých úseků.

8 ÚROVNĚ HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ NAPĚTÍ NA HLADINĚ 22 KV TNS

Celková úroveň harmonického zkreslení napětí na sběrně 22 kV trakčních napájecích stanic bude dána

- zkreslením napájecí distribuční sítě,
- zkreslením způsobeným provozem trakčních usměrňovačů,
- zkreslením způsobeným provozem zařízení napájených z kabelového rozvodu 22 kV.

Každý z těchto bodů je pouze příspěvkem k celkovému harmonickému zkreslení. Zkreslení napájecí sítě není možno korektně předvídat ani odhadovat, zejména v delším časovém horizontu. U zkreslení způsobených provozem zařízení napájených z kabelového rozvodu 22 kV lze předpokládat řádově nižší příspěvek, než u TU, daný nižším instalovaným resp. dostupným výkonem těchto zařízení. Dle dostupných informací mají být TS osazeny transformátory o výkonech v rozmezí 50 – 400 kVA (typicky však do 250 kVA), což je zlomek oproti plánovanému instalovanému výkonu TU. Současně není možno ve fázi projektové přípravy ani spolehlivě predikovat rozsah instalovaných zařízení, jejich výkony a možné negativní vlivy. Z výše uvedených důvodů jsou tyto dva příspěvky z posouzení vyjmuty.

Provozem trakčních usměrňovačů dochází ke generování proudových harmonických, které v místě připojení vlivem zkratové impedance vytvářejí napětové harmonické superponované na průběh základní harmonické. Tím dochází ke zkreslení (resp. příspěvku zkreslení) časového průběhu napětí. Spektrum generovaných harmonických je dáno typem usměrňovače (počtem „pulsů“). Pro usměrňovače používané v trakčních aplikacích trakce 3 kVDC u SŽDC jsou užívány 12tipulsní usměrňovače generující výhradně harmonické řádů $(12 \cdot n - 1)$ a $(12 \cdot n + 1)$, kde n je celé číslo v rozsahu $<1; \infty$).

Úroveň generovaných harmonických je ovlivněna charakterem odebíraného proudu. V případě nejnejpříznivějšího (avšak reálně nedosahovaného) obdélníkového průběhu lze pro výpočet úrovně aplikovat zjednodušení z Fourierovy transformace (tzv. amplitudový zákon)

$$I_n = I_1 / n \quad [\%, -]$$

kde n je řád harmonické, I_n proud n -té harmonické a I_1 proud základní harmonické. V reálném provozu jsou však tyto hodnoty řádově nižší, což je způsobeno „utlumením změn“ odebíraného proudu vlivem komutace proudu usměrňovačových diod. Toto utlumení a pokles je patrnější s nárůstem zatížení a dosahuje minim při zatížení TU nad 50% jmenovitého výkonu.

Pro potřeby výpočtů se uvažuje pouze s harmonickými řádů 11, 13, 23, 25 a ostatní harmonické jsou, s ohledem na jejich nízkou úroveň, zanedbány.

Rozbor předpokládaných zpětných vlivů byl proveden pro uvažovaná nová odběrná místa – tedy TNS Uničov a TNS Šternberk.

8.1 Podmínky platnosti výpočtu

- nejméně příznivý zkratový výkon (I_{ks3min})
 - 3,98 kA (na hladině 22 kV pro TNS Uničov)
 - 3,81 kA (na hladině 22 kV pro TNS Šternberk)
- zanedbání impedance kabelového propojení DTS (ČEZdi) a sběrný 22 kV TNS
- výpočet zkratové impedance sítě na jednotlivých harmonických dle PNE 33 3430-0
- hodnoty rušivých harmonických proudů dle SŽDC TKP33:2016
- hodnocení pouze harmonických průkazně generovaných TM
- uvažování předpokládaného trakčního zatížení všemi potenciálně napájenými usměrňovačovými skupinami
 - pro TNS Uničov 3 TU (2x TNS Uničov, 1x TMP Hradišín)
 - pro TNS Šternberk 2 TU (1x TNS Šternberk, 1x TMP Olomouc)

8.2 Výsledky

Výsledky jsou uvedeny v **příloze 2** (2A pro TNS Uničov, 2B pro TNS Šternberk).

8.3 Analýza výsledků a zhodnocení

Výše uvedený výpočet je kvalifikovaným odhadem příspěvku harmonického zkreslení napětí na sběrně 22 kV způsobeného provozem trakčních usměrňovačů. Uvedené hodnoty jsou pouze příspěvkem, kterým se navýší již existující zkreslení přicházející z distribuční sítě. Napětí s tímto zkreslením bude dále přítomno na všech vstupních stranách transformátorů 22/0,4 kV v napájených TS a stejně bude přeneseno i na stranu nn (3*230/400 V).

Pozn.: Při některých konfiguracích však může při špičkovém výkonu TNS dojít ke krátkodobému překročení stanovených limitů, avšak jelikož příslušné normy předepisují hodnocení sledovaných harmonických vlivů v 10minutových intervalech, nedojde zřejmě k překročení limitů.

Dle dostupných údajů a v souvislosti s výše uvedeným výpočtem lze předpokládat, že příspěvek ke zkreslení napětí na sběrně 22 kV způsobený provozem TU nebude mít nadlimitní charakter. Celkové hodnoty zkreslení však budou závislé též na zkreslení napájecího napětí linek 22 kV ČEZdi a působení odběrů napájených z rozvodu 22 kV.

9 OVLIVNĚNÍ NAPĚTÍ NA HLADINĚ NN (3*230/400 V)

9.1 Zdroje ovlivnění

Celková úroveň harmonického zkreslení napětí na hladině nn jednotlivých TS bude dána

- zkreslením napájecí distribuční sítě 22 kV ČEZdi,
- zkreslením sítě 22 kV SŽDC způsobeným provozem trakčních usměrňovačů,
- zkreslením způsobeným provozem zařízení připojených na hladině nn dané TS.

Zkreslení napájecí distribuční sítě 22 kV ČEZdi je dáno „znečištěním“ sítě ve zdrojovém bodě. Z podstaty věci a způsobu napájení nejsou úrovně zkreslení ze strany odběratele ovlivnitelné. Avšak vzhledem k obvyklým zdrojům zkreslení, charakteru síření tohoto zkreslení v distribučních sítích a topologiím těchto sítí lze důvodně předpokládat, že zkreslení napájecí sítě se bude blížit k nulovým hodnotám.

Zkreslení sítě 22 kV SŽDC je, v dané topologii, způsobeno zejména provozem trakčních usměrňovačů. Tyto „generují“ proudové harmonické, které na impedanci sítě v místě připojení (sběrna 22 kV) vytvářejí napěťové harmonické.

Zkreslení provozem zařízení na hladině nn je způsobeno, jako v případě TU, generováním harmonických proudů připojenými zařízeními a souvisejícím zkreslením napěťového průběhu. Jelikož míra vlivu (zkreslení) závisí na napěťové hladině a působících harmonických proudech, je vliv omezen pouze indukčností transformátorů 22/0,4 kV. Významným prvkem však je v tomto případě podíl výkonů způsobujících zkreslení – v případě TU jde o 0-15 MW (dle počtu provozovaných TU a jejich zatížení), v případě TS se jedná o teoretický maximální výkon všech připojených transformátorů v TS. Přitom je třeba uvažovat, že tyto výkony TS jsou odvozeny od výkonu instalovaného transformátoru a není zřejmé, jak budou transformátory zatíženy a jaké budou (z hlediska harmonických vlivů) charaktery dílčích zátěží.

9.2 Možnosti snížení negativních vlivů

Plně eliminovat veškeré negativní vlivy, harmonické zkreslení, tedy kompletní vyčištění sítě, není reálné. V tomto případě lze uvažovat nejvýše o snížení (resp. minimalizaci) negativních vlivů.

9.2.1 Zkreslení z napájecí sítě 22 kV ČEZdi

Zkreslení přicházející z napájecí sítě 22 kV ČEZdi není možno nijak efektivně ovlivnit. Filtrace by musela zahrnovat všechny obsažené harmonické a to na výkonech v jakých jsou generovány do sběren rozveden ČEZdi. To by však znamenalo nejen kompenzovat na úrovni 22 kV, ale též kompenzovat výkony, které nezpůsobilo odběrné zařízení, a zlepšovat na náklady provozovatele (SŽDC) parametry distribuční sítě.

9.2.2 Zkreslení provozem TU v TNS

Zkreslení vznikající provozem TU v TNS je možno teoreticky snížit analogicky k řešení filtračně-kompenzačního zařízení instalovaného na trakčních transformovnách – instalací sériových LC filtračních větví laděných na (resp. do blízkosti) kmitočty generovaných harmonických (tedy řádů 11 a 13, případně též 23 a 25). Toto filtrační zařízení by bylo možno realizovat jako pasivní (bez regulace) či aktivní (s řízením závislým na stavu napětí na sběrně 22 kV). Ve všech případech se však jedná o zařízení, která by musely být dimenzována na plné výkony harmonických odpovídající plnému výkonu TNS vč. TMP, tedy výkony v řádech jednotek MVA a s odpovídajícími činnými ztrátami. Z elektrického hlediska by též došlo k navýšení kapacitního charakteru TNS (LC větve mají v podrezonanční oblasti kapacitní charakter) a možnosti ovlivnění impedancí na signálech HDO. Z hlediska stavebního by se jednalo o další nezanedbatelnou investici obnášející, pro tyto výkony, další stavební objekt či významné rozšíření novostavby TNS.

V tomto případě se pro snížení negativních vlivů jako nejefektivnější, jak z hlediska investic tak i provozu, jeví řešení vhodnou volbou provozních konfigurací kabelového rozvodu 22 kV. Náhradním řešením může být zaslavnění dodávek elektrické energie na hladině 22 kV s jinými parametry, než jak je obvykle vyžadováno např. dle ČSN EN 50160 ed.3.

9.2.3 Zkreslení provozem zařízení na hladině nn

Zkreslení provozem zařízení na hladině nn je dalším přídatným zkreslením, které je způsobeno samotnými zařízeními napájenými z hladiny nn. V tomto případě není možno před realizací

stavby a výběrem (resp. upřesněním) konkrétních instalovaných zařízení nijak kvalifikovaně a spolehlivě určit či odhadnou hodnoty generovaných proudů a tím i výsledné zkreslení.

Snížení negativních vlivů je nejefektivnější právě na této úrovni – tedy u odběratelů nejvíce citlivých na kvalitu dodávané elektrické energie. Toto snížení je možno realizovat několika způsoby:

V případě „centrální“ filtrace pro celou TS na hladině nn by bylo třeba využít kombinovaný aktivní filtr zlepšující nejen parametry odběru vůči napájecí síti, ale též kvalitu napětí poskytovaného odběrnému zařízení. Zásadním problémem však je neschopnost definování stávajícího stavu a nového požadovaného stavu, neboť tato zařízení se konstruují, dimenzují a nastavují pro konkrétní potřeby daného místa připojení. Pakliže by bylo uvažováno instalovat zařízení bez znalosti těchto parametrů, pokud by toto některý z dodavatelů akceptoval, muselo by být dimenzováno na plný dostupný výkon transformátoru a maximální možné zkreslení.

Pozn.: Dle poznatků zhotovitele by zařízení navrhované pro filtrační výkon cca 350 kVA zaujímalo prostor 2-3 rozvaděčových polí (800x800x2000 mm) a cena by se, dle provedení a rozsahu filtrace, pohybovala v rozmezí 250 tis. Kč – 1 mil. Kč.

V případě filtrace jednotlivých větví na hladině nn by bylo možno postupovat diferencovaně.

- **Pro citlivá zařízení či odběry** (nebo jejich skupiny), u nichž je třeba prioritně zajistit kvalitu dodávané elektrické energie, lze použít sériové aktivní filtry, upravující parametry napětí ve směru ze sítě ke spotřebičům. Jediná možná zkreslení v napájení pro tato citlivá zařízení mohou být způsobena samotnými zařízeními napájenými přes tento filtr.

Pozn.: Dle dostupných údajů jsou filtry vyráběny ve škále filtračních výkonů od 20 do 200 kVA s možností filtrace harmonických až do řádu 11. Tímto by bylo možno relativně efektivně zajistit odpovídající snížení vlivů obvykle nejvíce rušících harmonických (liché řádů od 3 do 11). Prostorově přitom zaujímají tyto filtry dle přístupných specifikací jedno rozvaděčové pole 600x600x2000 mm.

- **Pro zařízení způsobující zkreslení** (nebo jejich skupiny), které zásadním způsobem mohou ovlivnit kvalitu elektrické energie, lze použít derivační (paralelní) filtry, upravující parametry napětí ve směru od spotřebiče do sítě.

Pozn.: Dle dostupných údajů jsou filtry vyráběny ve škále filtračních výkonů od 20 do 200 kVA s možností filtrace harmonických až do řádu 11. Tímto by bylo možno relativně efektivně zajistit odpovídající snížení vlivů obvykle nejvíce rušících harmonických (liché řádů od 3 do 11). Prostorově přitom zaujímají tyto filtry dle přístupných specifikací jedno rozvaděčové pole 600x600x2000 mm.

Kombinací výše uvedených řešení a případně jejich smluvním vymožením lze, dle názoru zhotovitele, docílit nejefektivnějšího řešení. Jelikož je rozvod 22 kV určen prioritně pro napájení zařízení a odběrů přímo souvisejících se zajištěním provozu dráhy, jsou obvykle používána zařízení s charakteristikami pro průmyslové prostředí, tedy odolná zhoršeným podmínkám napájení. Z rozvodu jsou však v některých případech napájeny i místní komerční odběry, kde je třeba zajistit kvalitu elektrické energie odpovídající veřejné distribuční síti. V takovém případě je možné pro tyto odběry instalovat sériové aktivní filtry, jejichž dimenzování by odpovídalo rezervovanému příkonu odběru. Tím by byly odfiltrovány jak vlivy přicházející z rozvodu 22 kV, tak i generované v rámci hladiny nn dané TS. V případě předpokladu dodržení kvality elektrické energie při dodávce z rozvodu 22 kV, avšak při negativních vlivech lokálně instalovaných zařízení je možno instalovat pro tato zařízení sériové aktivní filtry, eliminující jejich negativní vlivy.

10 PROHLÁŠENÍ ZHOTOVITELE

Výsledky studie a údaje uvedené v tomto protokolu se týkají pouze předmětu studie a v žádném případě nenahrazují schvalovací, povolovací ani jiné dokumenty vydávané, příp. požadované orgány státního dozoru či třetími subjekty. Uvedené výsledky vycházejí z údajů poskytnutých zhotoviteli zadavatelem, pročez nemůže zhotovitel ručit za případné vady, jejichž příčinou bylo vadné zadání. Tento protokol nesmí být bez souhlasu zhotovitele reprodukován jinak než celý a beze změn.

Výpočet a návrh kompenzace kabelového rozvodu

Název projektu: Elektrizace Šumperk - Libina - Uničov - Olomouc

Poznámka:

Vstupní údaje: kabel AXCES 3x95/25 12/20(24) kV

Legenda:

- I [km] - délka analyzovaného úseku kabelového vedení
- Q_C [kvar] - kapacitní ztráty kabelu
- Q_L [kvar] - navržená potřebná velikost kompenzační tlumivky

Úsek	I [km]	Q_C [kvar]	Q_L [kvar]
TNS Šumperk - žst. Nový Malín	4,580	174,10	0,00
žst. Nový Malín - TMP Hrabšířín	5,560	211,35	0,00
TMP Hrabšířín - žst. Libina	4,590	174,48	0,00
žst. Libina - zast. Nová Hradečná	5,730	217,82	0,00
zast. Nová Hradečná - žst. Troubelice	4,150	157,76	0,00
žst. Troubelice - TNS Uničov	4,230	160,80	0,00
TNS Uničov - žst. Uničov	0,280	10,64	0,00
žst. Uničov - zast. Uničov	2,000	76,03	0,00
zast. Uničov - žst. Újezd u Uničova	3,430	130,39	0,00
žst. Újezd u Uničova - z. Mladějovice (není LDS)		0,00	0,00
z. Mladějovice (není LDS) - z. Babice (není LDS)		0,00	0,00
z. Babice (není LDS) - žst. Šternberk		0,00	0,00
žst. Šternberk - TNS Šternberk	0,570	21,67	0,00
TNS Šternberk - žst. Bohuňovice	6,350	241,38	0,00
žst. Bohuňovice - TMP Olomouc	6,730	255,83	0,00
* bez R22 - v daném bodě je pouze propojení kabelu bez rozvodny 22 kV			
* není LDS - v daném bodě není využito LDS 22 kV			

Pozn.: Hodnoty kompenzačních tlumivek jsou určeny pro jednotlivé možné odpojitelné úseky kabelového vedení. Tlumivky lze umístit do libovolného místa daného úseku, ovšem v žádném případě nelze použít jedinou tlumivku se součtovým parametrem.

Doporučení k velikosti a instalaci tlumivek - viz. protokol.

Kvalifikovaný odhad očekávaných příspěvků napěťových harmonických způsobených provozem zařízení

Hodnocení vlivu na síť				Údaje o hodnoceném zařízení			
Napěťová hladina		22 000 V		Název		TNS Uničov	
Zkratový proud		3,98 kA		Charakter zařízení		usměrňovač výkonový, 12pulsů, transformátor 22/2x2,5 kV, Yyn1d0	
Zkratový výkon		151,72 MVA		Limity převzaty z		ČSN EN 50160 ed.3 - VN	

	TU	výkon [MW]		zátěž [%]	poměrné hodnoty harmonických napětí v [%] z hodnoty základní harmonické pro jednotlivé řády harmonických																			THDu	
		nom.	výpoč.		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37		39
		limity			-	5,0	6,0	5,0	1,5	3,5	3,0	0,5	2,0	1,5	0,5	1,5	1,5	-	-	-	-	-	-	-	8,0
1	3	15,9	1,6	10,0%	-					0,45	0,36					0,24	0,14								0,64
2	3	15,9	3,2	20,0%	-					0,74	0,66					0,51	0,51								1,23
3	3	15,9	4,8	30,0%	-					1,02	0,94					0,77	0,76								1,76
4	3	15,9	6,4	40,0%	-					1,36	1,27					0,97	0,93								2,29
5	3	15,9	8,0	50,0%	-					1,70	1,59					1,08	1,03								2,77
6	3	15,9	9,5	60,0%	-					2,03	1,88					1,13	1,06								3,17
7	3	15,9	11,1	70,0%	-					2,33	2,14					1,12	1,06								3,52
8	3	15,9	12,7	80,0%	-					2,60	2,35					1,11	1,08								3,83
9	3	15,9	14,3	90,0%	-					2,84	2,53					1,14	1,13								4,13
10	3	15,9	15,9	100,0%	-					3,05	2,67					1,20	1,23								4,40
11					-																				
12					-																				
13					-																				
14					-																				
15					-																				

Legenda: TU - počet provozovaných trakčních usměrňovačů
výkon - nom. - nominální výkon dané sestavy
výkon - simul. - výkon použitý pro simulaci
zátěž - poměrné zatížení sestavy při použitém výkonu

prázdné pole
-
hodnota
hodnota
informační pruh, indikují poměr příspěvku k limitu


údaje nejsou k dispozici, harmonické nejsou generovány
nehodnocený parametr, nestanovený limit
vyhovující hodnota
hodnota překračující limit
informační pruh, indikují poměr příspěvku k limitu

Kvalifikovaný odhad očekávaných příspěvků napěťových harmonických způsobených provozem zařízení

Hodnocení vlivu na síť				Údaje o hodnoceném zařízení			
Napěťová hladina		22 000 V		Název		TNS Šternberk	
Zkratový proud		3,81 kA		Charakter zařízení		usměrňovač výkonový, 12pulsů, transformátor 22/2x2,5 kV, Yyn1d0	
Zkratový výkon		145,18 MVA		Limity převzaty z		ČSN EN 50160 ed.3 - VN	

	TU	výkon [MW]		zátěž [%]	poměrné hodnoty harmonických napětí v [%] z hodnoty základní harmonické pro jednotlivé řády harmonických																			THDu	
		nom.	výpoč.		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37		39
		limity			-	5,0	6,0	5,0	1,5	3,5	3,0	0,5	2,0	1,5	0,5	1,5	1,5	-	-	-	-	-	-	-	8,0
1	2	10,6	1,1	10,0%	-					0,32	0,25					0,16	0,10								0,45
2	2	10,6	2,1	20,0%	-					0,52	0,46					0,36	0,35								0,85
3	2	10,6	3,2	30,0%	-					0,71	0,66					0,54	0,53								1,23
4	2	10,6	4,2	40,0%	-					0,95	0,88					0,67	0,65								1,60
5	2	10,6	5,3	50,0%	-					1,19	1,11					0,75	0,72								1,93
6	2	10,6	6,4	60,0%	-					1,41	1,31					0,79	0,74								2,21
7	2	10,6	7,4	70,0%	-					1,62	1,49					0,78	0,74								2,45
8	2	10,6	8,5	80,0%	-					1,81	1,64					0,78	0,75								2,67
9	2	10,6	9,5	90,0%	-					1,98	1,77					0,79	0,79								2,88
10	2	10,6	10,6	100,0%	-					2,12	1,86					0,83	0,85								3,07
11					-																				
12					-																				
13					-																				
14					-																				
15					-																				

Legenda:
 TU - počet provozovaných trakčních usměrňovačů
 výkon - nom. - nominální výkon dané sestavy
 výkon - simul. - výkon použitý pro simulaci
 zátěž - poměrné zatížení sestavy při použitém výkonu

prázdné pole
 -
 hodnota
hodnota
 informační pruh, indikují poměr příspěvku k limitu

údaje nejsou k dispozici, harmonické nejsou generovány
 nehodnocený parametr, nestanovený limit
 vyhovující hodnota
 hodnota překračující limit