

Моделиране на влиянието на параметрите на електроснабдителната система върху генерираните хармоници на ток и напрежение от мощни токоизправители

Николай Матанов, Сидер Сидеров

Технически университет, 1756 София

РЕЗЮМЕ. В съвременните технологични производства неизменно нараства използването на управляеми електронни преобразуватели, които са едни от основните източници на хармоници на тока и напрежението. Съществуват различни подходи за тяхната оценка и анализ с цел ограничаване вредното им влияние. В доклада е представен метод за наблюдаване работата на електроснабдителната система и конвенционалните електрически товари при наличието на мощни тиристорни изправители чрез използването на MATLAB

MODELING THE EFFECT OF PARAMETERS OF THE ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM ON THE HARMONICS OF CURRENT AND VOLTAGE OF HIGH-VOLTAGE CONVERTERS

ABSTRACT. In the modern plants the usage of the controllable electronic converters increase permanently. They are one of the main sources of the current and voltage harmonics. There are many methods to analyze harmonics level with the intent to reduce the bad influence over conventional load. The paper presents the study of the working of the electric supply system with the ordinary electrical loads and thyristor rectifiers, using MATLAB.

Въведение

Съвременните технологични производства са наситени с електронни преобразуватели (ЕП), които имат нелинейни V-A характеристики, поради което се явяват и основните източници на хармоници на тока и напрежението. С оглед оценка на тяхното ниво, поради необходимостта от ограничаване вредното им влияние и минимизиране нуждата от реални измервания, които са трудоемки и скъпи, се налага съставяне на модели на конкретните електроснабдителни системи.

Разработването на напълно адекватни модели, отразяващи работата на ЕП, конвенционалните товари и разпространението на хармониците в сложни електроснабдителни системи (ЕС) е тежка задача (Сидеров, Матанов, 2003). За решаването на такива задачи се използват специализирани софтуерни пакети, които условно могат да се разделят на няколко групи:

- софтуер с общо предназначение за симулиране на електронни (електрически) схеми. Такива например са *PSpice*, *Electronics Work Bench* и др., които често са насочени към електрониката, поради което включват и инструменти за подготовка на печатни платки;
- специализирани софтуерни продукти за анализ на различните режими на работа на електропреносните и разпределителни системи. Такива пакети са примерно *Power System Analysis Framework*, *ETAP*, *NEPLAN* (CAP. IEEE. 2002) и др. Характерното при тях е, че в големия програмен пакет със собствена работна среда има и модул за оценка нивото на хармониците;
- многофункционални програмни пакети, предназначени за решаването на най-разноородни

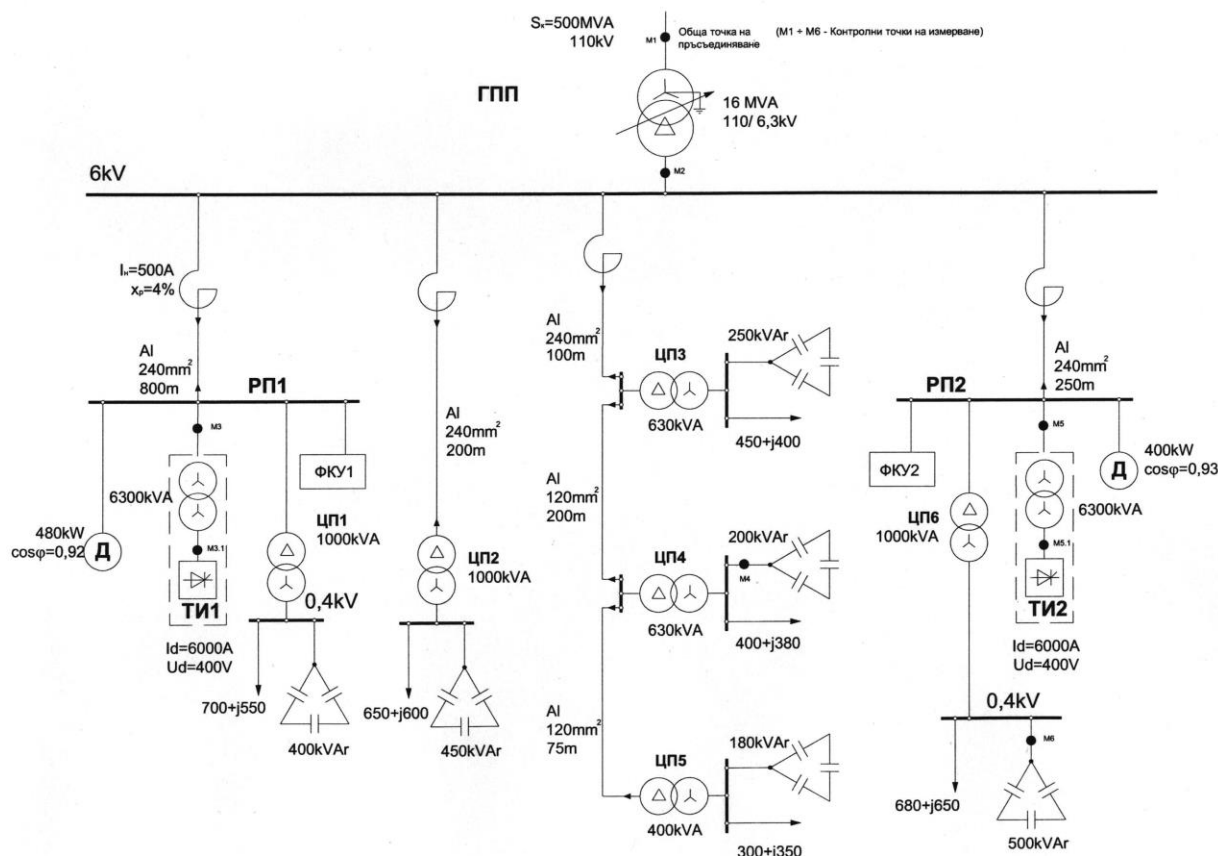
технически и научни задачи, на базата на изграждане на конкретни математични модели. Такъв софтуер е *MATLAB*. В *MATLAB* има богато разнообразие от библиотеки и готови блокове, които могат да симулират различни технически елементи. Специализираната част от *MATLAB/Simulink*, която е насочена към електроенергийните, електропреносните и електроразпределителните системи се нарича *SimPowerSystems* (актуалната версия е 3.1) и е разработена от същият научен институт, на който принадлежи и преди това споменатия пакет *PSAF*.

В *MATLAB*, освен готовите блокове, има възможност потребителите да създават свои блокове и да ги включват в модели. Могат да се правят само изчислителни операции, като за тази цел има богато разнообразие от математически функции и възможност да се програмират нови алгоритми и процедури.

Особености при изграждане на модела на ЕС

Стъпвайки на опита и базата от (Сидеров, Матанов, 2003) с цел подобряване на адекватността на моделите, възможностите за гъвкавото и лесното им развитие и бързото изчисляване, оценяване и визуализиране на исканите параметри е съставен модел на електроснабдителна система използвайки инструментите предоставени от *MATLAB/Simulink/SimPowerSystems*.

Актуализирайки схемата от (Сидеров, Матанов, 2003) е съставена еднолинейна схема на примерна ЕС на промишлен обект – фиг.1.



Фиг.1. Еднолинейна схема ЕС

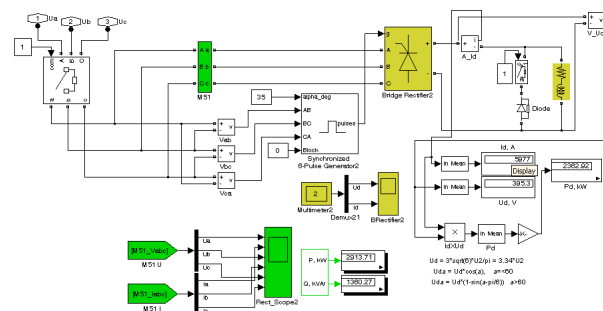
При съставянето на модела на схемата от фиг.1 за всеки от елементите се задават неговите номинални характеристики, както следва:

- Захранваща система: номинално напрежение, номинална честота, мощност на късо съединение, отношение X/R.
- Кабелни линии: номинална честота; специфично съпротивление; индуктивност и капацитет за 1 km дължина; за системите с права и нулева последователност; дължина в километри.
- Реактори: активно съпротивление и индуктивност.
- Силви трансформатори: номинална мощност и честота на захранващото напрежение; номинални линейни напрежения на намотките; активното съпротивление и индуктивността на всяка от намотките в относителни единици; активната и реактивна компонента на намагнитващия ток в относителни единици; вида на свързването (звезда, триъгълник) за всяка от намотките;
- Линейни (конвенционални) товари: номинално напрежение и честота; активна и реактивна мощност; начин на свързване.
- Кондензаторни батерии: номинално напрежение и честота; капацитивна мощност; активни загуби; начин на свързване.

Повечето необходими параметри са в именувани единици, с изключение съпротивленията на трансформаторите и могат да се вземат от паспортните данни на всички съоръжения или справочна литература. Освен това параметрите могат да се ползват без допълнителни

изчисления и привеждания. При подготовката на модела са използвани справочните данни за стандартно оборудване от (Стоянов и др., 1997).

За въвеждането на нелинейните товари е разработен отделен модел (подсистема) на трифазен мостов тиристорен изправител. На фиг.2 е показана изградената система (Bridge Rectifier).



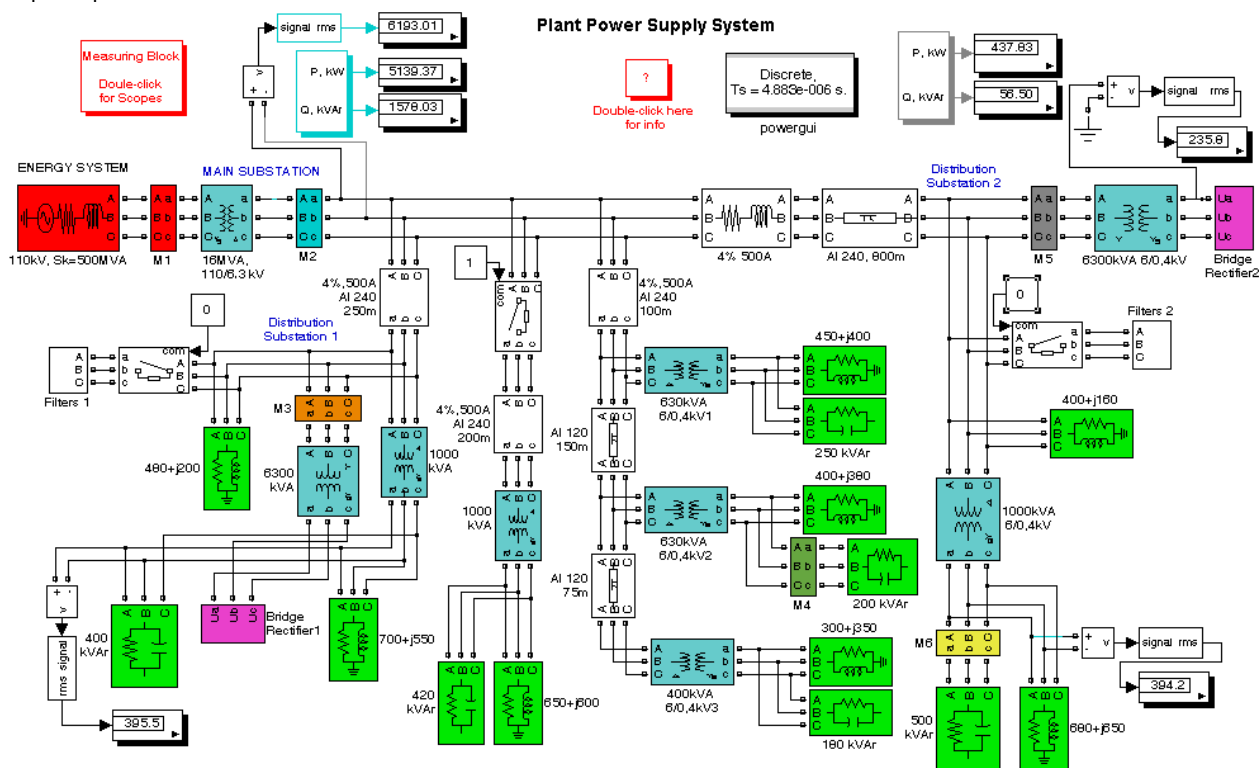
Фиг.2. Модел на трифазен мостов тиристорен изправител

Тя се състои от няколко основни блока: блок тиристори; блок за синхронизация със захранващото напрежение и изработване на управляващи импулси към тиристорите; блок за задаване на ъгъла на управление; активно-индуктивен товар. Към модела има и входен прекъсвач и измервателна апаратура – осцилографи за наблюдаване на моментните стойности на всички токове и напрежения и апарати за измерване средните стойности на величините на постояннотоковата страна на изправителя. Така направената подсистема е настроена и тествана за

коректната ѝ работа най-напред самостоятелно, без да се вгражда в модел на ЕС. Модела на тиристорния изправител (ТИ) е така синтезиран, че при въвеждането му в общия модел на ЕС да може лесно да се включва/изключва, да се променя режима му на работа, както и да се наблюдават всичките му електрически параметри.

Разработеният общ модел на ЕС от фиг.1 е даден на фиг.3.

На фиг.3 се вижда, че в общият модел има две подсистеми Filters1 и Filters2. Това са модели на филтро-компенсиращи устройства (ФКУ).



Фиг.3. Модел на електроснабдителна система с инсталирани мощни ТИ

Параметрите на ФКУ са изчислени по формулите дадени в (Dogan et al., 2002). ФКУ се състоят от два филтъра настроени съответно за 5 и 7 хармоници, един филтър настроен за 11 и 13 хармоници и един високочестотен филтър за хармоници с номера над 17.

Условия и варианти на симулация

Общите условия при, които е изследвана схемата и са направени всички симулации са:

- Разглежда се пълен трифазен модел на електроснабдителната система.
- Общата точка на присъединяване към системата на електроразпределителното дружество е на входа на трансформатора в главната понижаваща подстанция (ГПП) – т.М1 от фиг.1.
- Захранването е от система с мощност на късо съединение 500MVA, линейно захранващо напрежение 110kV, общ коефициент на несинусоидалност 0% и честота 50Hz.
- Всички симулации са при установен режим на работа на съоръженията, т.е. не се разглеждат преходните процеси и не се променят режимите на работа на линейните и нелинейни товари.
- Тиристорните изправители, когато са включени, работят в номинален режим, т.е. $U_d=400V$, $I_d=6000A$, $\alpha=35^\circ$ и активно-индуктивен товар.

- При решаването на диференциалните уравнения (симулациите) описващи моделите са използвани неявния метод на Рунге-Кута в началото на решенията и метод използващ формули за обратно диференциране от 2-ри ред (ode23tb), тъй като според (Дьяконов и др., 2002) при наличие на нелинейни елементи в схемите, какъвто е нашият случай, този подход дава най-добри резултати и бързодействие.
- Симулациите са правени при дискретно моделиране на системите, като честотата на дискретизация е 204.8kHz ($T_s=1/50/4096$). Решението за прилагането на дискретен модел, а не непрекъснат, е взето с цел ускоряване на симулациите (над три пъти), като предварително са сравнени резултатите получавани при непрекъснат и дискретен модел, за изследваните от нас сигнали, при което се установи, че за тази честота на дискретизиране грешката е средно под 1%. Освен това всички измервания се правят след установяване на всички сигнали.
- Анализ на сигналите в честотната област включва хармониците от 0 до 50. Възможно е отчитането и на хармоници с по-висок порядък, но при настройките на модела не бяха отчетени значими стойности на тези хармоници.

Вариантите на симулация, които са осъществени и изследвани са:

- **I вариант**, включени са всички линейни товари; ТИ1, ТИ2, ФКУ1 и ФКУ2 са изключени;

- **II вариант**, включени са всички товари - линейни и нелинейни, ФКУ1 и ФКУ2 са изключени;
- **III вариант**, като **II вариант** но с включени част от ФКУ1 и ФКУ2 – само филтрите за 5 и 7 хармоници;
- **IV вариант**, включени са всички съоръжения в схемата.

Опитни резултати и анализ

В табл.1 са дадени получените резултати за общия коефициент на несинусоидалност (THD), хармониците на токовете и напреженията в шестте контролни точки (M1÷M6, виж фиг.1) и коефициентите на претоварване по ток на кондензаторните батерии – Кпр.кб, за точки M4 и

M6. Стойностите в табл.1 са в проценти, освен за основния (първи) хармоник, който е в именувани единици, съответно волтове и амperi (той съответства на 100%).

От резултатите в табл.1 могат да се направят следните констатации:

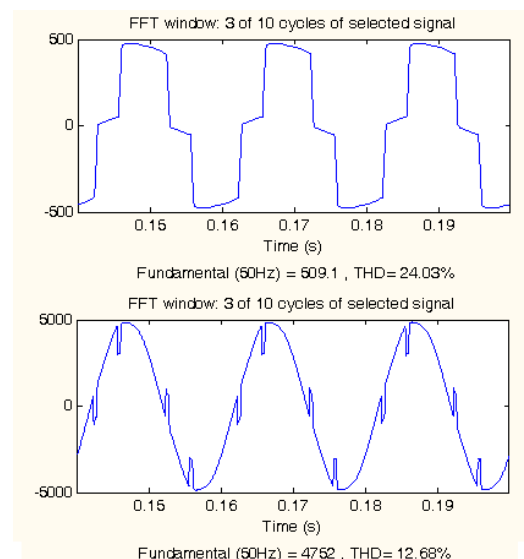
- При включени нелинейни товари (**II вариант**) коефициентите на несинусоидалност на тока и напрежението, както и нивата на отделните хармоници във всички контролни точки, надхвърлят изискванията на стандарти: IEEE Std. 519-1992 и EN 61000-3-6. Вторият е хармонизираният у нас стандарт БДС EN 61000-3-6.

Таблица 1

Коефициенти на несинусоидалност и хармоници на напрежението и тока за контролни точки M1÷M6, за I и II варианти

I	h	M1		M2		M3		M4		M5		M6	
		U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %
	THD, %	0	0.09	0	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
	1, V(A)	109248.0	35.2	3575.8	508.9	3551.8	41.7	225.1	281.4	3538.4	41.6	227.6	711.3
II	h	M1		M2		M3		M4		M5		M6	
		U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %
	THD, %	2.32	8.56	7.15	9.34	12.68	24.03	6.12	34.73	13.21	23.81	8.88	48.39
	1, V(A)	107975.2	68.3	3458.5	1095.3	3360.2	360.0	217.7	272.2	3322.0	334.4	213.7	667.5
	5	0.86	5.85	2.64	6.37	4.89	17.7	5.5	27.51	4.87	17.44	8.35	41.77
	7	0.89	4.36	2.73	4.75	4.93	11.97	2.5	17.56	5.19	11.98	2.8	19.64
	11	0.93	2.88	2.86	3.16	5.08	7.23	0.74	8.12	5.28	7.14	0.89	9.79
	13	0.89	2.35	2.74	2.56	4.83	5.74	0.48	6.22	5.06	5.73	0.59	7.63
	17	0.8	1.6	2.46	1.76	4.31	3.89	0.23	3.96	4.49	3.84	0.29	4.91
	19	0.74	1.34	2.28	1.46	3.97	3.19	0.17	3.26	4.19	3.2	0.22	4.09
	23	0.61	0.9	1.87	0.99	3.26	2.16	0.09	2.14	3.4	2.13	0.12	2.68
	25	0.54	0.75	1.67	0.93	2.89	1.77	0.07	1.78	3.08	1.79	0.09	2.23
	29	0.4	0.46	1.23	0.52	2.13	1.13	-	1.1	2.25	1.1	-	1.39
	31	0.34	0.38	1.04	0.42	1.78	0.88	-	0.88	1.93	0.9	-	1.12
	35	0.2	0.2	0.63	0.22	1.07	0.47	-	0.46	1.15	0.48	-	0.59
	37	0.15	0.14	0.46	0.15	0.76	0.32	-	0.33	0.87	0.34	-	0.42
	41	0.04	0.004	0.13	0.04	0.2	0.08	-	0.08	0.25	0.09	-	0.11
	43	0.02	0.02	0.06	0.02	0.11	0.04	-	0.04	0.12	0.04	-	0.05
	47	0.01	0.015	0.05	0.01	0.09	0.03	-	-	0.1	-	-	-
	49	0.01	0.01	0.04	0.01	0.08	0.02	-	-	0.08	-	-	-
	Кпр.кб	-	-	-	-	-	-	-	102.4	-	-	-	104.2

- Големината и спектъра на хармониците на тока в точки M3 и M5 (точки на включване на нелинейните товари) отговарят на теоретично известите зависимости и съотношения (Dugan et al., 2002), което потвърждава коректността на моделите. Формата на тока и напрежението за точка M3 са дадени на фиг.4, а спектралния състав и големината се виждат в табл.1.
- Коефициента на несинусоидалност на тока на кондензаторните батерии в цехови подстанции 4 и 6 (ЦП4 и ЦП6) са по-високи и от тези в точките на включване на ТИ. От данните се вижда, че основен дял за това имат 5 и 7 хармоници. Формата на тока (горе) и напрежението (долу) в точка M4 са дадени на фиг.5. Коефициентите на претоварване по ток на кондензаторните батерии в ЦП4 и ЦП6 не са над допустимите, но трябва да се има предвид, че в случая на входа на ГПП е подадено номиналното напрежение 110kV, а на шините ниско напрежение имаме отрицателна стойност на отклонението на напрежението (в допустимите граници), поради работа на системата в максимален режим. При положителни отклонения на напрежението (примерно нощните часове) е възможно надхвърляне на допустимите стойности.



Фиг.4. Форми на тока и напрежението за точка M3, II вариант

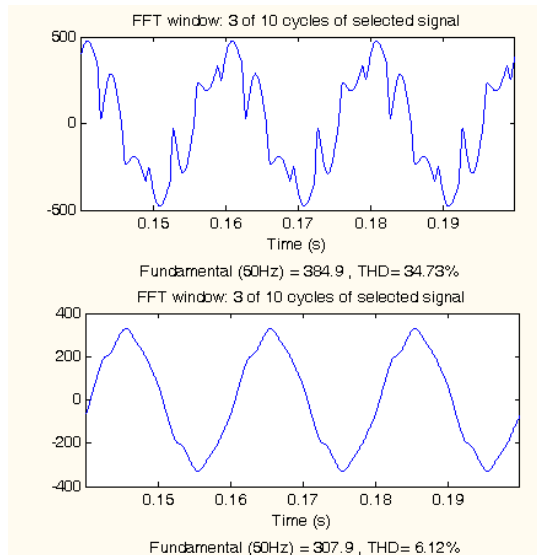
Това може да се провери и на разглеждания модел, но изисква допълнителни симулации в подходящ режим на работа.

Имайки предвид нивото и състава на хармониците на тока и фактора на мощност на общите шини са изчислени филтро-компенсиращи устройства 1 и 2. Изчисляването е

извършено на две стъпки. Първо са определени параметрите на филтри за 5 и 7 хармоници (най-значимите), проверено е нивото на хармониците в различните контролни точки след включването на филтрите (**III вариант**). Второ добавени са филтър за 11 и 13 хармоници и високо-честотен филтър за хармоници над 17 (**IV вариант**). Данните от симулациите за **III и IV варианти** са дадени в табл.2

От данните в табл.2 могат се направят следните изводи:

- При включени филтри за 5 и 7 хармоници (**III варианти**) големината на тези хармоници на тока рязко намалява, което доказва необходимостта от ФКУ.
- Коефициентите на несинусоидалност на напрежението в общата точка на присъединяване M1 е в допустимите граници (2% - IEEE 519-1992), но нивото на хармониците на тока с номера 11, 19 и от 23 до 35 не са в нормираните граници.



Фиг.5. Форми на тока и напрежението за точка M4, II вариант

- Коефициента на несинусоидалност на напрежението на общите шини на ГПП е над 5%, което не отговаря на изискванията на IEEE 519-1992.

Таблица 2

Коефициенти на несинусоидалност и хармоници на напрежението и тока за контролни точки M1÷M6, за **III и IV варианти**

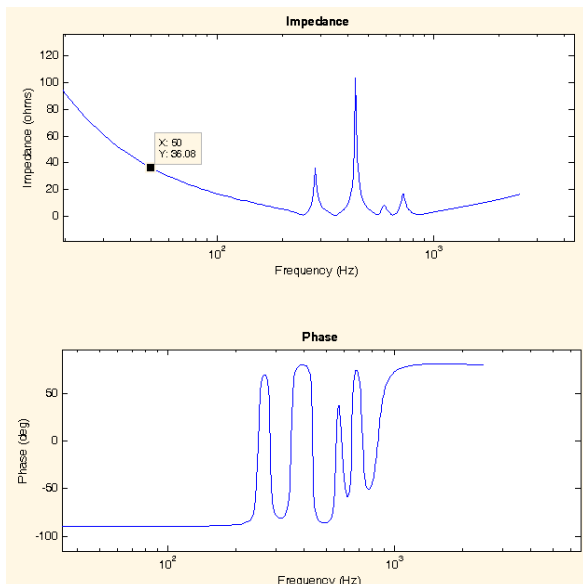
	h	M1		M2		M3		M4		M5		M6	
		U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %	U, %	I, %
III	THD, %	1.75	3.77	5.35	4.16	9.33	25.1	1.25	10.42	9.74	24.97	1.72	13.26
	1, V(A)	108258.0	65.7	3485.3	1047.2	3403.3	359.4	219.4	274.3	3366.5	336.8	216.6	676.8
	5	0.16	1.14	0.48	1.24	0.9	18.02	1.01	5.07	0.87	17.84	1.5	7.47
	7	0.1	0.55	0.33	0.6	0.61	12.23	0.3	2.08	0.58	12.24	0.31	2.19
	11	0.63	2.03	1.92	2.24	3.39	7.68	0.5	5.48	3.51	7.63	0.59	6.5
	13	0.64	1.75	1.96	1.93	3.44	6.2	0.34	4.42	3.57	6.2	0.41	5.35
	17	0.64	1.34	1.95	1.48	3.4	4.48	0.19	3.16	3.54	4.47	0.23	3.89
	19	0.61	1.15	1.88	1.27	3.28	3.8	0.14	2.68	3.42	3.82	0.17	3.31
	23	0.56	0.88	1.74	0.98	3.01	2.86	0.09	2.01	3.16	2.86	0.11	2.49
	25	0.54	0.77	1.65	0.85	2.87	2.47	0.07	1.73	3	2.49	0.09	2.16
	29	0.47	0.58	1.44	0.64	2.5	1.86	0.04	1.3	2.63	1.87	0.06	1.62
	31	0.44	0.5	1.35	0.57	2.34	1.6	0.04	1.13	2.45	1.63	0.04	1.41
	35	0.36	0.37	1.12	0.42	1.92	1.17	0.02	0.83	2.04	1.95	0.03	1.04
	37	0.33	0.32	1.02	0.36	1.76	1	0.02	0.71	1.86	1.03	0.02	0.89
	41	0.26	0.22	0.78	0.25	1.34	0.69	0.01	0.5	1.45	0.72	-	0.62
	43	0.22	0.18	0.69	0.21	1.19	0.58	0.009	0.41	1.27	0.6	-	0.52
	47	0.15	0.12	0.47	0.13	0.79	0.35	0.006	0.26	0.87	0.38	-	0.33
	49	0.12	0.09	0.38	0.1	0.67	0.27	0.004	0.2	0.72	0.3	-	0.26
	Кпр.кб	-	-	-	-	-	-	-	98.0	-	-	-	96.0
IV	THD, %	0.77	1.67	2.35	1.84	4.12	25.74	1.1	6.15	4.21	25.66	1.62	8.69
	1, V(A)	108399.5	6560.5	3502.3	1043.0	3429.5	3677.7	213.4	275.6	3394.1	34	218.4	682.4
	5	0.16	0.19	0.5	1.29	0.89	18.08	1.04	5.23	0.91	17.93	1.58	7.89
	7	0.11	0.58	0.34	0.64	0.66	12.38	0.31	2.16	0.6	12.36	0.32	2.26
	11	0.14	0.46	0.43	0.5	0.78	7.86	0.11	1.24	0.75	7.85	0.13	1.4
	13	0.08	0.23	0.25	0.26	0.47	6.44	0.04	0.56	0.43	6.43	0.05	0.65
	17	0.1	0.22	0.32	0.25	0.57	4.82	0.03	0.52	0.56	4.84	0.04	0.62
	19	0.15	0.28	0.47	0.31	0.84	4.16	0.03	0.66	0.82	4.16	0.04	0.79
	23	0.23	0.37	0.71	0.4	1.24	3.31	0.03	0.82	1.26	3.35	0.04	1
	25	0.24	0.35	0.74	0.39	1.31	2.91	0.03	0.78	1.31	2.93	0.04	0.93
	29	0.25	0.31	0.78	0.35	1.35	2.36	0.02	0.71	1.39	2.41	0.03	0.87
	31	0.25	0.28	0.76	0.32	1.33	2.09	0.02	0.63	1.35	2.12	0.02	0.76
	35	0.24	0.25	0.74	0.28	1.27	1.71	0.01	0.55	1.32	1.77	0.01	0.68
	37	0.23	0.21	0.7	0.25	1.22	1.51	-	0.48	1.25	1.55	-	0.59
	41	0.21	0.19	0.65	0.21	1.11	1.24	-	0.42	1.18	1.3	-	0.52
	43	0.2	0.16	0.6	0.19	1.05	1.08	-	0.36	1.09	1.13	-	0.44
	47	0.18	0.14	0.55	0.15	0.92	0.87	-	0.3	1	0.94	-	0.38
	49	0.16	0.12	0.49	0.14	0.85	0.76	-	0.26	0.9	0.81	-	0.31
	Кпр.кб	-	-	-	-	-	-	-	98.1	-	-	-	96.3

EN 61000-3-6 е по либерален – допуска до 6.5%, но той нормира нивото на индивидуалните хармоници и в случая хармониците на напрежението от 17 до 25 не отговарят не неговите изисквания.

- Коефициентите на несинусоидалност на напрежението в точките на включване на ТИ, където се захранват и други конвенционални товари, е над допустимите 6.5% (**III варианти**).

От казаното до тук е ясно, че се налага допълнително ограничаване на хармониците на тока от тиристорните изправители. Това в случая е направено с разширяване обхвата на ФКУ - **IV варианти**. От резултатите в табл.2 се вижда, че всички показатели, след поставянето на допълнителните филтри са в допустимите граници.

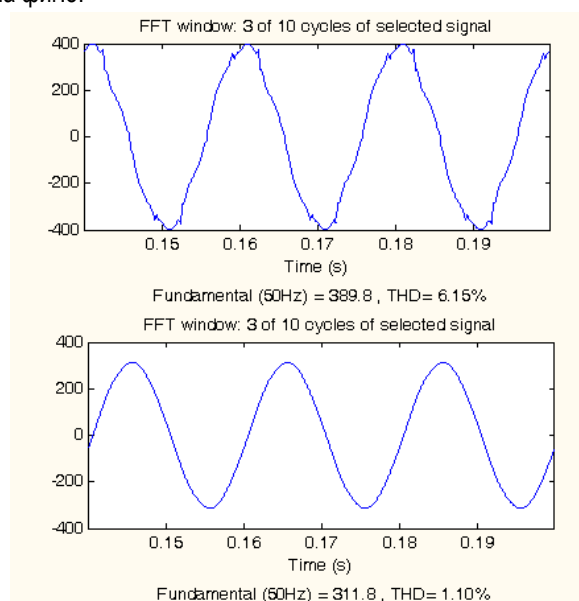
На фиг.6 е показана промяната на импеданса на ФКУ в честотната област за **IV варианти**.



Фиг.6. Промяна на импеданса на ФКУ2 в честотната област (IV вариант)

Освен ефекта за ограничаване на хармониците, е постигнато и подобряване на фактора на мощност на извода на ГПП (точка M2), като от 0.89 преди поставянето на филтрите, само с компенсиране в цеховите подстанции на ниско напрежение, е показан на 0.94.

Формата на тока и напрежението за точка M4 за **IV варианти** са дадени на фиг.7, която се различава от тази на фиг.5.



Фиг.7. Форми на тока и напрежението за точка M4, IV вариант

Изводи

На базата на представените резултати от различните варианти на изследване на примерната схема на електрооснабдяване на промишлено предприятие, можем да направим следните обобщени изводи:

- ✚ Съставеният трифазен модел позволява да се анализира разпространението на хармоници на ток и напрежение в сложни йерархични разпределителни мрежи в промишлеността и населените места.
- ✚ Съставеният модел позволява да се установи степента на претоварване на основни елементи на електрооснабдителната система (кондензаторни батерии, силови трансформатори и др.) въз основа на наличието на висши хармоници на тока и напрежението.
- ✚ Моделът позволява да се оцени ефективността на ограничаването на нивото на хармониците на тока и напрежението с помощта на ФКУ.

Литература

- Дьяконов В., В.Круглов. 2002. *MATLAB анализ, идентификация и моделирование систем*. Питер, Санкт-Петербург.
- Сидеров С., Н.Матанов. 2003. Анализ на хармониците на ток и напрежение в електрооснабдителни системи с инсталирани мощни електронни преобразуватели. Тринадесета научна конференция - "ТРАНСПОРТ 2003"; София, 13–14 ноември.
- Стоянов Ст. и др. 1997. Справочник по енергетика. т.1 и 2, АБС Техника, София.
- Computer Applications in Power*. 2002. IEEE, Vol.14 N. 2, April.
- Dugan C.R., M.F.McGranaghan, S.Santos, H.W.Beatty. 2002. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, New York.
- EN 61000-3-6. Electromagnetic Compatibility (EMC). *Limits. Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems*. Basic EMC publication.
- IEEE Standard 519-1992. *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*.