

И.ГОНСАЛЕС ПАЛАУ, инженер, *palauiliana@gmail.com*
Горно-металлургический институт им. Антонио Нуньес Хименес, Моа, Куба

I.GONSALES PALAU, engineer, *palauiliana@gmail.com*
Mining and Metallurgical Institute, Moa, Cuba

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Дан анализ методов моделирования элементов электрической сети при наличии высших гармоник в напряжении и токе. Показано, что при расчете режимов работы сети необходимо учитывать поверхностный эффект и эффект от возникновения вихревых токов. При учете этих факторов погрешность расчета режимов потребления электроэнергии значительно снижается.

Ключевые слова: электрическая сеть, гармоники, коэффициент мощности, напряжение, мощность.

SELECTION OF PARAMETERS ECONOMICALLY ADVANTAGE REACTIVE POWER COMPENSATION

The article content different methods of modeling elements of the electrical network in the presence of harmonics in voltage and current, but also studied and compared. It is shown that when calculating the power network should be considered a surface effect and the effect on the occurrence of eddy currents. When accounting for these factors, the calculation error mode power consumption is significantly reduced.

Key words: electrical network, harmonics, power factor, voltage, power.

Компенсация реактивной мощности в сложных электрических сетях до сих пор представляется задачей труднореализуемой с точки зрения поиска наиболее эффективного ее решения. Особенно это проявляется в сетях предприятий по добыче и переработке полезных ископаемых, где большую роль играет нагрузка с ее неравномерным характером. Кроме того, решение задачи усложняется все более увеличивающейся долей нелинейной нагрузки, применяемой на вышеуказанных предприятиях. Состав нелинейной нагрузки определяет спектр гармоник. Согласно стандартам, применяемым практически во всем мире, при моделировании режимов работы электрической сети необходимо учитывать составляющие тока и напряжения до сороковой гармоники.

Очевидно, что учет высших гармоник влияет на формирование расчетных схем, отображающих схему электроснабжения, и на выбор методов оптимизационных расчетов компенсации реактивной мощности. Таким образом, задача компенсации реактивной мощности делится на две части: моделирование электрической сети и выбор метода расчета ее режимов с целью определения параметров компенсирующих устройств, позволяющих обеспечить наибольшее значение коэффициента мощности на входе предприятия.

Основными элементами электрической сети предприятия с нагрузкой являются линии электропередачи (воздушная или кабельная), трансформаторы, двигатели, реакторы и генераторы.

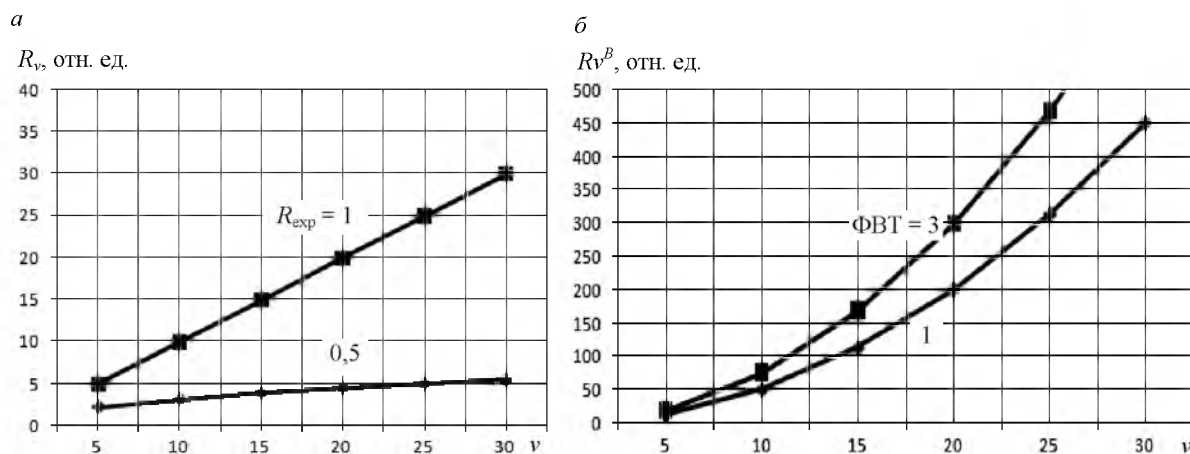


Рис.1. Зависимость R от R_{exp} (а) и ФВТ (б)

При наличии только первой основной гармоники активное сопротивление R_v и реактивное сопротивление X_v элементов системы электроснабжения являются величинами постоянными.

При возникновении высших гармоник, согласно различным исследованиям [2], сопротивления можно представить в следующих формах:

$$1) R_v = R_1(1 + Av^B); X_v = X_1v, \quad (1)$$

где A и B – коэффициенты, имеющие численные значения 0,5 и 1,5 соответственно; v – номер гармоники; R_1 и X_1 – соответственно активное и реактивное сопротивление на первой гармонике;

$$2) R_v = R_{1B}v^{R_{exp}}; X_v = Xv, \quad (2)$$

где R_{exp} – коэффициент, определяемый экспериментально;

$$3) R_v = R_{1B} \left(\frac{1 + FBTv^2}{1 + FBT} \right), \quad (3)$$

где ФВТ – фактор вихревых токов; R_{1B} – сопротивление вихревым токам первой гармоники.

Следует отметить, что выражения (1)-(3) для сопротивлений были получены в результате экспериментальных исследований [1]. Значения R_{exp} и ФВТ следующие:

Элемент сети	R_{exp}	ФВТ
Трансформатор	0,5-1,0	1,0-3,0
Система	0,0-0,8	–

Генератор	0,3-0,6	–
Линия / кабель	0,5	–
Реактор	0,5-1,0	0,8-3,0
Двигатель	0,2-0,4	–

Таким образом, для модели электрической сети в зависимости от гармонического состава напряжения и тока можно выбрать три варианта представления элементов. Установлено, что второй и третий варианты дают наиболее точные результаты.

На основе сравнения результатов различных исследований установлено, что применение выражений (2) и (3) дают наиболее точный результат. Однако следует отметить, что эти выражения касаются различной природы воздействия высших гармоник на сопротивление элементов системы электроснабжения и должны рассматриваться в совокупности. С другой стороны, абсолютные значения сопротивлений в зависимости от факторов R_{exp} или ФВТ могут существенно различаться, а потому и учет их в схемах замещения должен быть соответствующим образом оценен.

Для количественной оценки влияния частоты на значения сопротивлений по выражениям (2) и (3) были построены зависимости, показанные на рис.1.

Среди известных методов расчета электрических сетей наиболее распространены методы Гаусса – Зейделя, Ньютона – Рафсона и по программе Easy Power.

Все эти методы предполагают решение системы уравнений вида

Сравнение результатов расчетов по программам Easy Power и DYCSSE

Номер узла		Программа				P_p , МВт	Q_p , Мвар
		Easy Power		DYCSE			
Вход	Выход	P_p , МВт	Q_p , Мвар	P_p , МВт	Q_p , Мвар		
01	03	-2,667	0,649	-2,667	0,642	0,00	0,03
	100	2,667	-0,648	2,667	-0,642	0,00	0,03
02	04	5,572	-0,368	5,570	-0,360	0,01	0,04
	100	-5,571	0,368	-5,570	0,360	0,01	0,04
03	01	2,669	-0,608	2,669	-0,602	0,00	0,03
	05	2,217	1,341	2,217	1,341	0,00	0,00
	06	3,014	1,853	3,017	1,853	0,02	0,00
	09	1,828	1,192	1,831	1,193	0,01	0,01
	26	0,769	0,500	0,770	0,500	0,00	0,00
	50	-10,503	-4,277	-10,504	-4,286	0,00	0,04
04	G2	8,000	5,138	8,000	5,131	0,00	0,04
	02	-5,562	0,534	-5,560	0,526	0,01	0,04
	07	2,081	1,423	2,084	1,421	0,02	0,01
	08	6,364	0,004	6,364	0,004	0,00	0,00
	15	2,664	1,647	2,664	1,647	0,00	0,00
	24	2,445	1,530	2,448	1,532	0,01	0,01
05	03	-2,217	-1,340	-2,217	-1,341	0,00	0,00
	39	1,246	0,775	1,246	0,776	0,00	0,00
	49	0,971	0,565	0,971	0,565	0,00	0,00
06	03	-3,017	-1,852	-3,016	-1,852	0,01	0,00
	11	0,354	0,206	0,354	0,206	0,00	0,00
	19	2,662	1,646	2,662	1,646	0,00	0,00
08	16	0,425	0,304	0,425	0,304	0,00	0,00
	27	1,663	1,119	1,659	1,118	0,02	0,01
	04	-6,360	0,000	-6,361	0,000	0,01	0,00

$$[Y][U] = [I],$$

где $[Y]$, $[U]$, $[I]$ – матрицы соответственно проводимостей, напряжений и токов ветвей схемы замещения сети в комплексном виде.

Метод Гаусса – Зейделя характеризуется тем, что система решается даже при начальных значениях U и I , далеких от реальных. Отсюда, как следствие, медленное схождение процесса вычислений. В этом случае применяют фактор ускорения.

Метод Ньютона – Рафсона широко известен своей надежностью и быстрой сходимостью. Однако некоторые специалисты, и среди них С.Л.Сайнс [3], утверждают, что решение в этом случае не может сходиться, если значения начальных условий недостаточно близки к реальным.

По мнению некоторых авторов [4], программное обеспечение Easy Power имеет лучшие характеристики по сравнению с предыдущими методами. Однако пользоваться им невозможно из-за недоступности его в научно-техническом обиходе. Исходя из вышесказанного, в работе был выбран и запрограммирован автором метод Гаусса – Зейделя (программа DYCSSE). В основу решения положено выражение

$$U_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(\frac{P_p - jQ_p}{U_{Rp} - jU_{Ip}} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (U_q Y_{pq}) \right),$$

где $p = 1, 2, \dots, n$ – номер узла в схеме; n – количество узлов; P_p и Q_p – соответственно активная и реактивные мощности ветвей схемы; U_{Rp} и U_{Ip} – соответственно активная

Таблица 2

Напряжения, рассчитанные по программе Easy Power, кВ

Номер гармоники	Узел (рис.2)											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	115,00	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	2,40	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
5	0,073	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,015	0,005	0,004	0,005	0,011	0,011
7	0,056	0,061	0,061	0,062	0,062	0,062	0,012	0,004	0,003	0,004	0,008	0,008
11	0,024	0,026	0,026	0,026	0,027	0,027	0,005	0,002	0,001	0,002	0,004	0,004
13	0,029	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,006	0,002	0,001	0,002	0,004	0,004
17	0,025	0,027	0,027	0,027	0,028	0,027	0,005	0,002	0,001	0,002	0,004	0,004
19	0,023	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,005	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003
КНИ, %	0,092	0,832	0,834	0,836	0,839	0,836	0,924	1,505	1,130	1,505	3,226	3,226

Таблица 3

Напряжения, рассчитанные по программе DYSCSE

Номер гармоники	Узел (рис.2)											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	115,00	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	2,40	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
5	0,075	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,015	0,005	0,003	0,005	0,010	0,010
7	0,057	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062	0,012	0,003	0,002	0,003	0,007	0,007
11	0,024	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,005	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003
13	0,029	0,031	0,061	0,061	0,061	0,061	0,006	0,001	0,001	0,001	0,004	0,004
17	0,025	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,005	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003
19	0,023	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,004	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003
КНИ, %	0,09	0,83	0,85	0,85	0,85	0,85	0,93	1,53	1,14	1,53	3,08	3,08

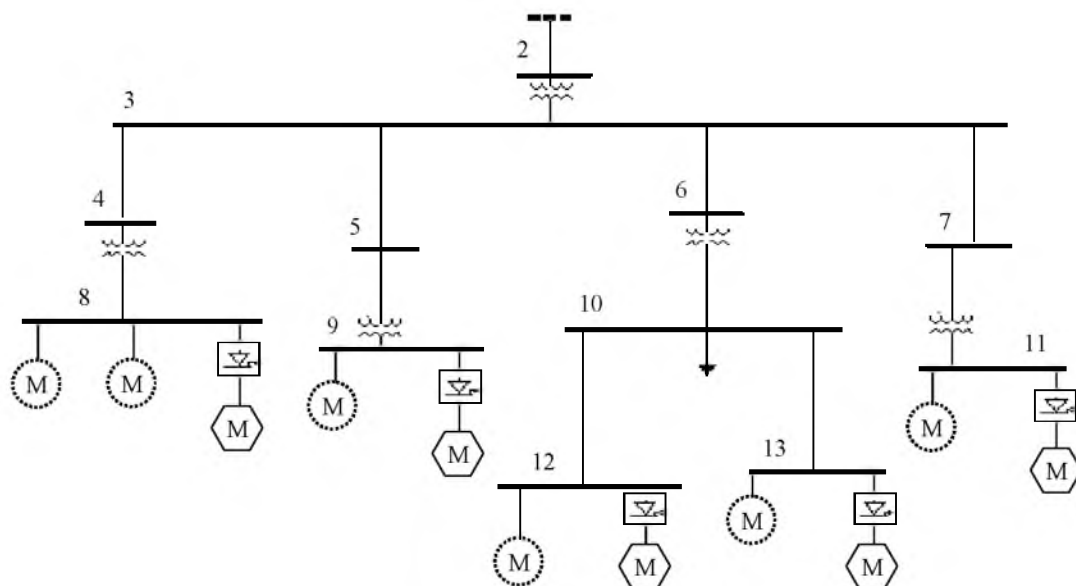


Рис.2. Электрическая схема к табл.2 и 3

1-13 – узлы; М – двигатель

и реактивные мощности узла схемы; Y_{pp} – комплексная проводимость p -й ветви; U_q и Y_{pq} – соответственно напряжение и проводимость в комплексном виде p -й ветви.

На первом этапе был проведен расчет только для первой гармоники и для примера, представленного в работе [1]. Сравнение результатов расчетов, полученных двумя методами, представлено в табл.1. Как видно, наибольшая разница составила 1,142 Мвар, что подтверждает хорошую и достаточную сходимость метода Гаусса – Зейделя.

На втором этапе был произведен расчет с учетом высших гармоник и коэффициентов. Неучет поправочных коэффициентов при определении напряжений в узлах сети может привести к погрешности до 5 % от его номинального напряжения. Такая погрешность для напряжения недопустима. Результаты расчета напряжений по двум методам приведены в табл.2 и 3.

Наибольшая погрешность при сравнении составила 2,8 %. Однако следует отметить,

что коэффициенты по программе DYCSE не были рассчитаны точно. Тем не менее метод Гаусса – Зейделя, реализованный в виде программного продукта DYCSE, может применяться для расчета как сетей, содержащих только основную гармонику, так и сетей с нелинейными искажениями. В этом случае необходимо применять поправочные коэффициенты, учитывающие влияние гармоник на все элементы электрической сети, включая трансформаторы и нагрузку.

REFERENCES

1. *Inelec I.L.* The graphical solution for power system analysis. USA. 2006. 230 p.
2. IEEE. Recommended practice for industrial and commercial power systems analysis. USA. 1997. 118 p.
3. *Sains S.L.* Formulation of the harmonic load flow // IEEE Transaction on Power Systems. 1995. Vol.13. N 1. P.123-135.
4. *Garcia P., Pereira J., Sandoval C., Vender M., Martins N.* Three-phase power flow calculations using the current injection method // IEEE Transaction on Power Systems. 2000. Vol.5. N 1. P. 98-105.