

А.В.ЕФИМОВСКИЙ, соискатель, НТУ «ХПИ»

Ю.В. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Розглянуто питання про доцільність використання синхронних двигунів для компенсації реактивної потужності. Дана порівняльна характеристика компенсації за допомогою синхронного двигуна і конденсаторних батарей.

A question is considered about expedience of the use of synchronous engines for indemnification of reactive power. Comparative description of indemnification is given by a synchronous engine and condensers batteries.

Постановка проблемы. В настоящее время прирост потребления реактивной мощности (РМ) существенно превышает прирост потребления активной. Вследствие чего увеличиваются перетоки РМ. РМ, протекая по элементам электрической сети, обладающим активным сопротивлением вызывает в них дополнительные потери мощности и электрической энергии. Кроме того, РМ снижают пропускную способность линий электропередач и трансформаторов, либо вынуждают увеличивать сечение проводов, осуществлять прокладку дополнительных кабельных линий, замену трансформаторов на большую номинальную мощность. Большая часть этих потерь приходится на сети 0,4 – 10 кВ, так как в этих сетях находятся основные потребители РМ: асинхронные двигатели, силовые трансформаторы и электробытовые приборы и лампы. Долевое участие этих потребителей составляет 50, 25 и 10% соответственно [1]. Также всё большую долю в общем объёме суммарных нагрузок занимают приёмники с нелинейными характеристиками и повышенным потреблением РМ. Поэтому именно в этих сетях наиболее эффективно устанавливать источники реактивной мощности (ИРМ) с помощью которых и осуществляется компенсация реактивной мощности (КРМ) [2]. Наряду со специальными средствами КРМ, в качестве ИРМ в большинстве источников [] рекомендуют в первую очередь использовать синхронные двигатели (СД), если они уже установлены у потребителя из технологических соображений. Например, СД находят применение в молотковых дробилках и шаровых мельницах горнорудных предприятий, в буровых лебедках нефтяной промышленности, в ножницах и пилах для металла, в непрерывных прокатных станах в металлургии и т. д. [3,4].

Рассматривая СД, как компенсатор РМ, можно отметить его преимущества и недостатки. Одним из преимуществ является плавность регулировки величины отдаваемой или потребляемой РМ (такая

необходимость может возникнуть в ночное время, когда в сети наблюдается избыток РМ). Это достигается путём изменения тока возбуждения двигателя. Основной недостаток использования СД в качестве КРМ – большая удельная величина потребляемой активной мощности на выработку реактивной. Например, дополнительные потери активной мощности в СД превышают в 5-12 раз (в зависимости от типа СД, его конструкции, загрузки по активной мощности) потери в конденсаторной батарее (КБ) [5].

Анализ последних исследований и публикаций. Практически во всей литературе [3-8] говорится о том, что достаточно мощные СД (250 кВт и выше) выгодно использовать в качестве компенсирующего устройства, если на предприятии они уже установлены из технологических соображений. В частности в [8] на примере доказывается целесообразность использования СД для КРМ и рассчитана экономическая выгода, которую получает потребитель. Однако в [9] данные результаты были поставлены под сомнение и на том же примере показано, что СД не выгодно использовать в режиме генерации РМ.

Цель статьи. Определить действительно ли во всех случаях целесообразно использование СД для КРМ в сетях потребителя.

Основные материалы исследований. Используя исходные данные приведенные в [8], был произведен расчёт потерь активной и реактивной мощности в сети с СД, приведенной на рис. 1.

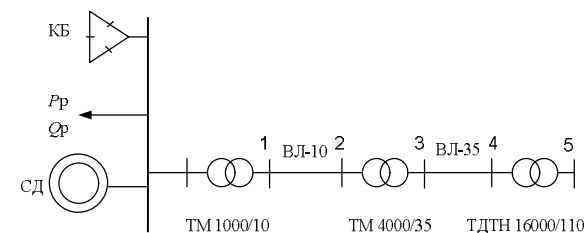


Рис. 1 - Схема электрической сети с СД, используемых для компенсации реактивной мощности

Расчётная активная и реактивная нагрузки потребителя составляют $P_p = 560$ кВт и $Q_p = 420$ квар соответственно. Число часов максимума использования нагрузки составляет $T_m = 3,5$ ч/сут, а время максимальных потерь $\tau_m = 1,53$ ч/сут.

Номинальная активная мощность СД составляет $P_{СДном} = 250$ кВт. Номинальный коэффициент мощности $\varphi = 0,9$ (опережающий ток).

Коэффициенты удельных потерь активной мощности в СД: $D_1=1,74$ кВт, $D_2=2,18$ кВт. Коэффициент загрузки СД по активной мощности $\beta_{СД}=0,8$.

По условию устойчивой работы СД, минимальную величину располагаемой реактивной мощности СД можно определить как [2]:

$$Q_{ген} = P_{СДном} \cdot \beta_{СД} \cdot \varphi, \quad (1)$$

где φ коэффициент реактивной мощности СД, соответствующий номинальному коэффициенту мощности $\varphi = 0,9$.

Следовательно, величина минимальной реактивной мощности генерируемой рассматриваемым СД составляет 96 квар. Также заметим, что если двигатель недогружен по активной мощности, то его можно дополнительно загрузить по реактивной. Величину максимальной РМ отдаваемой двигателем можно определить по номограммам [10].

Активные потери в СД, которые идут на выработку РМ, можно определить по следующей формуле [11]:

$$\Delta P = D_1 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}} + D_2 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}} \quad (2)$$

Необходимо отметить, что данная формула является приближённой, потому что величина ΔP зависит не только от генерируемой РМ СД $Q_{СД}$, но и от загрузки двигателя по активной мощности, изменению напряжения подводящего к статору, остальных параметров СД [5].

Был произведен расчёт потерь в сети, приведенной на рис. 1 для четырёх режимов ее работы: 1) В сети потребителя отсутствуют устройства КРМ; 2) КРМ осуществляется только с помощью СД (генерация РМ СД 96 квар); 3) КРМ осуществляется с помощью СД и КБ (генерация РМ 96 квар и 320 квар соответственно); 4) КРМ осуществляется с помощью КБ (генерация РМ КБ 420 квар);

Результаты расчётов сведены в табл. 1. (индексы нагрузок и потерь от 1 до 5 соответствуют точке сети, приведенной на рисунке).

Таблица 1

	Без КРМ	КРМ с помощью СД	$\delta 1$	КРМ с помощью СД+КБ	$\delta 2$	КРМ с помощью КБ	$\delta 3$
	1	2	3	4	5	6	7
P_n , кВт	760	763,11	+3,11	764,00	+4,00	761,26	+1,26
Q_n , квар	420	324,00	-96,00	4,00	-416,00	0,01	-419,99
S_n , кВА	868,3	829,04	-39,29	764,01	-104,32	761,26	-107,07

ΔP_1 , кВт	10,74	10,01	-0,73	8,87	-1,87	8,82	-1,92
Продолжение таблицы 1							
1	2	3	4	5	6	7	8
ΔQ_1 , квар	55,47	51,80	-3,67	46,10	-9,37	45,87	-9,60
$P_{\Sigma 1}$, кВт	770,7	773,12	+2,38	772,87	+2,13	770,08	-0,66
$Q_{\Sigma 1}$, квар	475,7	375,80	-99,67	50,10	-425,37	45,88	-429,59
$S_{\Sigma 1}$, кВА	905,6	859,62	-45,99	774,49	-131,11	771,45	-134,15
ΔP_2 , кВт	1,48	1,33	-0,15	1,08	-0,40	1,07	-0,40
ΔQ_2 , квар	2,15	1,94	-0,21	1,57	-0,58	1,56	-0,59
$P_{\Sigma 2}$, кВт	772,2	774,45	+2,23	773,95	+1,73	771,16	-1,06
$Q_{\Sigma 2}$, квар	477,6	377,74	-99,88	51,68	-425,94	47,44	-430,18
$S_{\Sigma 2}$, кВА	907,9	861,66	-46,33	775,67	-132,32	772,61	-135,37
ΔP_3 , кВт	7,03	6,85	-0,17	6,56	-0,47	6,55	-0,48
ΔQ_3 , квар	51,46	49,92	-1,54	47,28	-4,18	47,19	-4,27
$P_{\Sigma 3}$, кВт	779,2	781,31	+2,06	780,51	+1,26	777,71	-1,54
$Q_{\Sigma 3}$, квар	529,8	427,66	-101,42	98,96	-430,12	94,64	-434,44
$S_{\Sigma 3}$, кВА	941,8	890,69	-51,19	786,76	-155,13	783,44	-158,44
ΔP_4 , кВт	4,56	4,08	-0,48	3,18	-1,38	3,16	-1,41
ΔQ_4 , квар	4,35	3,89	-0,46	3,03	-1,31	3,01	-1,34
$P_{\Sigma 4}$, кВт	783,1	785,39	+1,58	783,69	-0,12	780,86	-2,95
$Q_{\Sigma 4}$, квар	533,2	431,55	-101,88	101,99	-431,4	97,64	-435,78
$S_{\Sigma 4}$, кВА	948,1	896,14	-51,96	790,30	-157,8	786,94	-161,16
ΔP_5 , кВт	21,35	21,31	-0,04	21,24	-0,11	21,24	-0,11
ΔQ_5 , квар	133,9	133,27	-0,63	132,10	-1,80	132,06	-1,83
P_{Σ} , кВт	805,2	806,70	+1,54	804,94	-0,22	802,10	-3,06
Q_{Σ} , квар	667,3	564,82	-102,51	234,09	-433,23	229,71	-437,62
S_{Σ} , кВА	1045,7	984,77	-60,98	838,28	-207,47	834,35	-211,41

Из табл. 1 видно, что суммарное потребление активной мощности в точке 5 больше при КРМ с помощью СД, чем при отсутствии такой компенсации. Таким образом, очевидно, что в данной схеме при данной

величине нагрузки компенсировать реактивную составляющую мощности нецелесообразно.

Как видно из таблицы 1, при более высоких $\cos\varphi$ целесообразней КРМ осуществлять с помощью КБ. Расчёты показали, что в случае полной КРМ с помощью КБ потребление активной мощности в точке 5 уменьшается более чем на 3 кВт, в то время как при частичной КРМ с помощью СД суммарные потери активной мощности увеличиваются более чем на 1,5 кВт. Таким образом, использование СД в качестве компенсатора РМ не выгодно при данных значениях потребляемой мощности и параметрах сети.

Далее были произведены расчёты активных потерь в случае увеличения реактивной нагрузки потребителя. Оказалось, что реактивная нагрузка потребителя, при которой в случае КРМ с помощью СД активные потери в точке 5 были бы такие же, как и в случае без КРМ соответствует величине реактивной нагрузки равной 700 квар, ($\cos\varphi=0,73$). Таким образом, при снижении $\cos\varphi$ нагрузки эффективность использования СД для КРМ повышается. Об этом свидетельствуют результаты расчетов, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

$P_{нагр}, \text{кВт}$	760			
$Q_{нагр}, \text{квар}$	96	420	700	800
$\cos\varphi$	1	0,88	0,73	0,69
Величина скомпенсированной РМ с помощью СД	96			
Уменьшение потерь активной мощности	-2,56	-1,54	0	+0,47

Полученные результаты расчетов (табл.1 и 2) ставят под сомнение однозначность утверждения о целесообразности первоочередного использования СД в качестве средства КРМ.

СД мощностью 250 кВт выполняются также на напряжение 6 (10) кВ. Предположим, что такой двигатель установлен в точке 1 электрической сети представленной на рис. 1. Остальные параметры СД такие же, как и в предыдущем случае. Результаты расчётов приведены в таблице 3.

Таблица 3

	Без КРМ	КРМ с помощью СД	$\delta 1$	КРМ с помощью СД+КБ	$\delta 2$	КРМ с помощью КБ	$\delta 3$
	2	3	4	5	6	7	8
$P_n, \text{кВт}$	560	560	0	560	0	560	0

$Q_n, \text{квар}$	420	420	0	420	0	420	0
Продолжение таблицы 3							
1	2	3	4	5	6	7	8
$S_n, \text{кВА}$	700	700	0	700	0	700	0
$\Delta P_1, \text{кВт}$	6,33	6,33	0	6,33	0	6,33	0
$\Delta Q_1, \text{квар}$	45,19	45,19	0	45,19	0	45,19	0
$P_{\Sigma 1}, \text{кВт}$	766,3	769,44	+3,11	770,96	+4,63	767,73	+1,40
$Q_{\Sigma 1}, \text{квар}$	465,2	369,19	-96,00	4,00	-461,19	0	-465,18
$S_{\Sigma 1}, \text{кВА}$	896,5	853,43	-43,04	770,97	-125,50	767,73	-128,74
$\Delta P_2, \text{кВт}$	1,45	1,31	-0,14	1,07	-0,38	1,06	-0,39
$\Delta Q_2, \text{квар}$	2,67	2,27	-0,41	1,56	-1,12	1,54	-1,13
$P_{\Sigma 2}, \text{кВт}$	767,8	770,75	+2,97	772,03	+4,25	768,79	+1,01
$Q_{\Sigma 2}, \text{квар}$	467,9	371,46	-96,41	1,57	-466,30	1,55	-466,31
$S_{\Sigma 2}, \text{кВА}$	899	855,59	-43,51	772,03	-127,07	768,79	-130,30
$\Delta P_3, \text{кВт}$	6,99	6,83	-0,16	6,55	-0,44	6,54	-0,46
$\Delta Q_3, \text{квар}$	51,16	49,73	-1,43	47,18	-3,98	47,08	-4,08
$P_{\Sigma 3}, \text{кВт}$	774,7	777,58	+2,81	778,58	+3,81	775,33	+0,56
$Q_{\Sigma 3}, \text{квар}$	519	421,18	-97,84	48,74	-470,28	48,64	-470,38
$S_{\Sigma 3}, \text{кВА}$	932,5	884,32	-48,22	780,10	-152,45	776,85	-155,7
$\Delta P_4, \text{кВт}$	4,47	4,02	-0,45	3,13	-1,34	3,10	-1,37
$\Delta Q_4, \text{квар}$	4,26	3,83	-0,43	2,98	-1,28	2,96	-1,30
$P_{\Sigma 4}, \text{кВт}$	779,2	781,61	+2,36	781,71	+2,47	778,43	-0,81
$Q_{\Sigma 4}, \text{квар}$	523,2	425,01	-98,27	51,72	-471,56	51,59	-471,7
$S_{\Sigma 4}, \text{кВА}$	938,6	889,69	-48,95	783,42	-155,22	780,14	-158,5
$\Delta P_5, \text{кВт}$	21,34	21,31	-0,03	21,24	-0,10	21,24	-0,11
$\Delta Q_5, \text{квар}$	133,7	133,19	-0,59	132,03	-1,75	131,99	-1,79
$P_{\Sigma}, \text{кВт}$	800,5	802,91	+2,33	802,95	+2,36	799,67	-0,92
$Q_{\Sigma}, \text{квар}$	657,6	558,21	-98,86	183,75	-473,31	183,59	-473,4
$S_{\Sigma}, \text{кВА}$	1035,7	977,89	-57,81	823,70	-211,99	820,47	-215,2

Как видно из таблицы 3, результаты расчётов аналогичны приведенным

в таблице 1. Более того, суммарные активные потери увеличились с 1,5 кВт до 2,3 кВт, в случае КРМ с помощью СД. Тем самым порог коэффициента мощности нагрузки, при котором выгодно использовать СД в качестве КРМ, также снижается.

Выводы. 1. Использование СД в качестве КРМ целесообразно, когда снижение активных потерь от перетока РМ превышает возникающие дополнительные активные потери в СД при выработке РМ, что возможно только при низких коэффициентах мощности нагрузки. 2. Эффективность использования СД в качестве ИРМ повышается при снижении коэффициента мощности нагрузки. 3. Выгодней использовать СД в качестве КРМ на напряжении 0,4 кВ нежели на 10 кВ.

Список литературы: 1. *Зорин В.В.* Системы электроснабжения общего назначения / *В.В. Зорин, В.В.Тесленко* // Учебник для студентов ВУЗов.–Чернигов: ЧГТУ, 2005. – 341 с. 2. *Железко Ю.С.* Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / *Ю.С Железко.* - М.: Энергоатомиздат, 1989.-176 с. 3. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий: Учебное пособие для вузов / уклад. *А.А. Федоров, Л.Е. Старкова.* - М: Энергоатомиздат, 1987.-368 с. 4. Производство и распределение электрической энергии: электротехнический справочник: В 3т. Т.3. 2кн. Кн1 / под ред. *И.Н.Орлова.* - 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-880 с. 5. *Литвак Л.В.* Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. М.:Энергоатомиздат, 1963. – 256 с. 6. *Ипатенко Н.Р.* Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей средней мощности на постоянство $\cos\varphi=1$ / *Н.Р. Ипатенко.* - Брянск: Б ИТМ, 1974. 7. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / *И.А. Сыромятников.* - 4-е изд., перераб. и доп - М. Энергоатомиздат 1984, 240 с. 8. *Омельчук А.О.* Щодо компенсації реактивної потужності синхронними двигунами споживачів / *А.О. Омельчук* // Енергетика і електрифікація. – 2005. - №3. – С. 32-35. 9. *Дорошенко О.І.* Щодо застосування синхронних двигунів для потреб компенсації реактивного навантаження споживачів / *О.І. Дорошенко* // Промелектро. – 2005. - №4. -С.36-40. 10. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. *Ю.Г. Барыбина* и др. – М: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

Поступила в редколлегию 03.09.2010