

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

*Милых Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,
Полякова Наталия Владимировна, ассистент,
Дубяга Ростислав Валентинович, Дубяга Святослав Валентинович,
студенты*

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина*

Введение. На рис.1 дана схема простой электроэнергетической системы (ЭЭС) переменного тока. Электростанция представлена трехфазным синхронным генератором G , предприятие – потребитель электроэнергии – трехфазной нагрузкой Z_{load} , их соединяет трехфазная линия электропередачи (ЛЭП) lin , передающая систему линейных напряжений $3\sim U$. Генератор и нагрузка соединены по схеме «звезда». Для них обозначены соответствующие фазные напряжения и токи, т.е. U_s, I_s и U_z, I_z , а также комплексные сопротивления фаз нагрузки Z_z . Обмотка возбуждения генератора питается постоянным напряжением U_E и током I_E .

При заданных напряжении и мощности P_z при симметричной нагрузке ее фазный ток:

$$I_z = \frac{P_z}{3 \cdot U_z \cos \varphi_z}. \quad (1)$$

Этот ток зависит от коэффициента мощности $\cos \varphi_z$, где φ_z – фазовый сдвиг между U_z и I_z . Током нагрузки непосредственно определяется ток ЛЭП и генератора I_s . Промышленное электрооборудование чаще всего является активно-индуктивной нагрузкой и оказывается, что $\cos \varphi_z < 1$. Поэтому ЛЭП и генераторы на электростанциях загружаются избыточным током из-за наличия в нем значительной реактивной составляющей.

Повышение коэффициента мощности ЭЭС является актуальной задачей, решение которой позволит при неизменной мощности P_z уменьшить установленную мощность генераторов и ЛЭП, а также потери активной мощности у них. Этим самым уменьшатся капитальные и эксплуатационные расходы в ЭЭС в целом [1].

Цель работы – сравнительный анализ вариантов повышения коэффициента мощности ЭЭС посредством синхронного компенсатора (СК).

Параметры элементов ЭЭС. Рассматриваемую трехфазную систему (рис.1) будем считать симметричной. Тогда расчеты можно проводить для

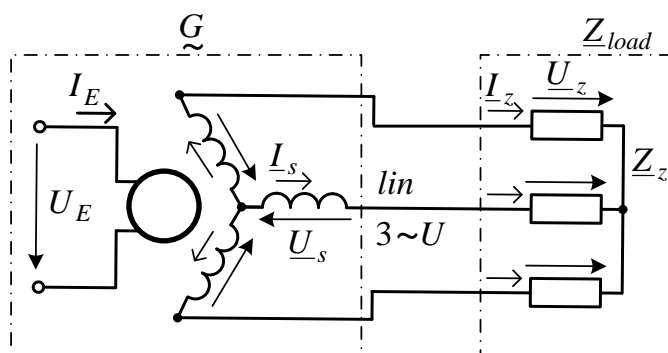


Рис. 1 – Упрощенная схема трехфазной электроэнергетической системы

одной из фаз – как однофазной цепи синусоидального тока. При этом будем использовать символический метод, когда напряжения, токи и сопротивления представляются комплексными числами, а их буквенные обозначения подчеркиваются. И вместо принципиальной схемы (рис.1) будем использовать электрические схемы замещения, в которых реальные объекты заменяются соответствующими им идеальными элементами [2].

Для расчетов принимаем следующие параметры системы.

1. *Нагрузка* – приемник электроэнергии: линейное и фазное напряжения $U_{Lz} = 6,3$ кВ, $U_z = 3464$ В; активная мощность $P_z = 11,43$ МВт; коэффициент мощности $\cos \varphi_z = 0,8$, фазовый сдвиг между током и напряжением $\varphi_z = 36,87^\circ$. Тогда по (1) фазный ток $I_z = 1375$ А, эквивалентные фазные полное, активное и реактивное (индуктивное) сопротивления [2]:

$$Z_z = U_z / I_z = 2,519 \text{ Ом}; R_z = Z_z \cos \varphi_z = 2,015 \text{ Ом}; X_{Lz} = Z_z \sin \varphi_z = 1,511 \text{ Ом}.$$

Приемник электроэнергии надо обеспечить номинальными напряжением, током и мощностью. Поэтому во всех последующих расчетах это принимается за основу, в т.ч. неизменными являются комплексное значение напряжения приемника $\underline{U}_z = U_z e^{j\psi_{Uz}} = 3464$ В с начальной фазой $\psi_{Uz} = 0$.

2. *Синхронный генератор*: номинальные полная мощность $S_{SG} = 15$ МВ·А; линейное и фазное напряжения $U_G = 6,3$ кВ; $U_{sN} = 3637$ В; коэффициент мощности $\cos \varphi_{GN} = 0,8$, активная мощность $P_{GN} = S_{GN} \cos \varphi_{GN} = 12$ МВт; фазный ток по аналогии с (1) – $I_{GN} = 1375$ А. Сопротивления фазной обмотки: активное $R_s = 0,066$ Ом; реактивное (синхронное – индуктивное) $X_{Ls} = 3,2$ Ом.

3. *Линия электропередачи*: условно сосредоточенные сопротивления провода ЛЭП активное $R_{lin} = 0,11$ Ом и реактивное $X_{Llin} = 0,063$ Ом определены из условия, что при номинальном режиме системы (рис.1) падение напряжения в ЛЭП будет таким, что при номинальном напряжении генератора U_{sN} на приемнике будет обеспечено его заданное напряжение U_z .

Расчет базовой ЭЭС. Базовым считаем вариант ЭЭС без СК. Схема замещения электрической цепи одной фазы такой системы показана на рис.2. Здесь использованы уже представленные идеальные элементы, а также идеальный источник фазной ЭДС генератора E_G , которая обеспечивается в обмотке статора магнитным полем ротора, а влияние реакции якоря и активного сопротивления обмотки статора учитывается падением напряжения \underline{U}_{ss} .

Символическим методом расчета получены токи ЛЭП и генератора $I_G = I_z = 1375$ А, падения напряжения в проводах ЛЭП и внутри генератора $U_{lin} = 174$ В; $U_{ss} = 4402$ В; напряжение на зажимах генератора $U_s = 3637$ В; его ЭДС

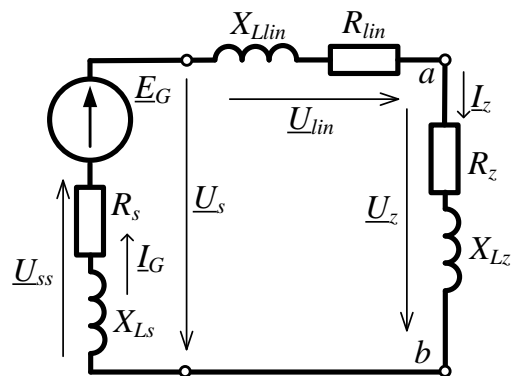


Рис.2. Модель исходной ЭЭС

$E_G=7225$ В. Векторная диаграмма дана на рис.3 в указанных масштабах.

Потери мощности внутри генератора $\Delta P_G = 3 \cdot R_s \cdot I_G^2 = 375$ кВт, в проводах ЛЭП $\Delta P_{lin} = 3 \cdot R_{lin} \cdot I_G^2 = 624$ кВт и суммарные потери $\Delta P_0 = P_G + P_{lin} = 999$ кВт.

Полная $S_G = 3 \cdot U_s \cdot I_G = 15,0$ МВ·А и активная $P_G = P_z + \Delta P_{lin} = 12$ МВт мощности генератора соответствует заданным его номинальным параметрам.

Расчет ЭЭС с синхронным компенсатором. СК – это трехфазная синхронная электрическая машина в режиме выработки реактивной энергии с опережающим фазовым сдвигом между током и напряжением, которая работает без механической нагрузки [3].

Для установки в систему выбрали два реальных варианта СК с подходящим напряжением: линейное $U_{CN}=6,3$ кВ, фазное $U_{sCN}=3637$ В. Их номинальные полная мощность и фазный ток, а также активное сопротивление фазной обмотки составляют:

СК1 – $S_{CN} = 5$ МВ·А; $I_{sCN} = 458$ А;

$$R_{sC} = 0,052 \text{ Ом};$$

СК2 – $S_{CN} = 10$ МВ·А; $I_{sCN} = 870$ А;

$$R_{sC} = 0,022 \text{ Ом}.$$

Расчетами было выявлено, что при номинальных токах I_{sCN} эквивалентные емкостные сопротивления СК X_{sC} должны составлять 7,55 Ом и 4,2 Ом в первом и втором вариантах, соответственно.

Были рассмотрены два способа включения СК: 1) параллельно потребителю; 2) параллельно генератору. Соответствующие схемы замещения для них представлены на рис.4 и рис.5.

Результаты расчетов при установленных параметрах ЭЭС и двух СК представлены в табл.1 – на всю трехфазную систему.

Здесь $K_Q = Q_C / Q_{Lz}$ – коэффициент компенсации, который выражает соотношение реактивных мощностей СК и приемника. При $K_Q=1,0$ осу-

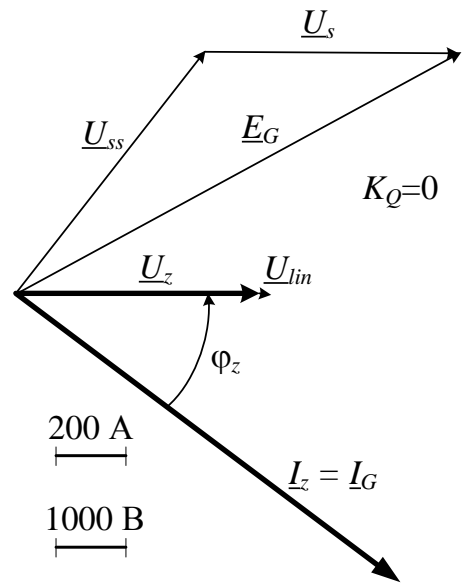


Рис. 3. Векторная диаграмма для исходной модели ЭЭС

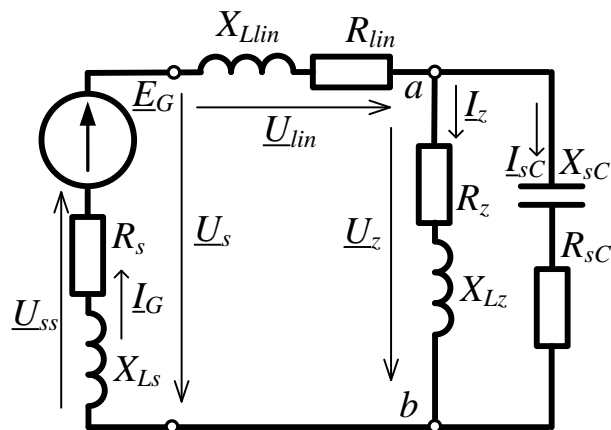


Рис. 4. Модель ЭЭС с СК параллельно потребителю

существляется полная компенсация реактивной мощности приемника электроэнергии, при $K_Q=0,556$ – примерно половинная компенсация.

В табл.1 к уже представленным величинам добавились ΔP_C – потери мощности в СК, которые теперь вошли в суммарные потери ΔP_Σ , уменьшение $dP = \Delta P_0 - \Delta P_\Sigma$ потерь мощности, где ΔP_0 – потери в случае отсутствия компенсации, а также приводится полная мощность СК S_C .

Очевидно, что рациональным является вариант СК1 при $S_{CN} = 5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, так как удвоение мощности в СК2, а, значит, габаритов и цены, не приносит столь же ощутимого уменьшения потерь мощности dP по сравнению с исходной ЭЭС и полной мощностью S_G синхронного генератора.

Таблица 1. Параметры ЭЭС при разной степени компенсации реактивной мощности приемника для двух вариантов СК (на три фазы)

СК	K_Q	X_{sC}	I_{sC}	I_G	ΔP_G	ΔP_{lin}	ΔP_C	ΔP_Σ	U_s	S_G	E_G	dP	S_C
-	-	Ом	А	А	кВт	кВт	кВт	кВт	В	МВ·А	В	кВт	МВ·А
Без компенсаторов													
-	0	∞	0	1375	375	624	0	999	3637	15,0	7225	-	0
Компенсатор включено параллельно приемнику													
СК1	0,556	7,55	459	1163	268	446	33	747	3609	12,59	6005	252	4768
СК2	1,0	4,2	825	1105	242	403	45	689	3586	11,89	5137	310	8571
Компенсатор включено параллельно генератору													
СК1	0,556	7,55	482	1159	266	596	64	926	3637	12,64	5946	73	5006
СК2	1,0	4,2	866	1111	244	574	100	918	3637	12,12	5030	81	8999

Сравнивая варианты подключения СК, можно констатировать, что вариант подключения параллельно генератору на электростанции, по сравнению с вариантом расположения у потребителя, по целому ряду параметров проигрывает. В частности, для основного варианта СК с мощностью 5 МВ·А экономия на потерях мощности dP уменьшается в 3,5 раза.

Дело в том, что в схеме по рис.5 по ЛЭП перекачивается вся реактивная энергия потребителя и здесь ток такой же $I_z=1375 \text{ А}$, как и в потребителе. А вот в варианте по рис.4 компенсируется реактивная энергия именно потребителя и по ЛЭП проходит значительно меньший ток $I_G=1161 \text{ А}$ – вместо 1375 А.

Для основного варианта – подключения СК параллельно приемнику, на рис.6 и рис.7 даны векторные диаграммы, соответственно для СК1 и СК2.

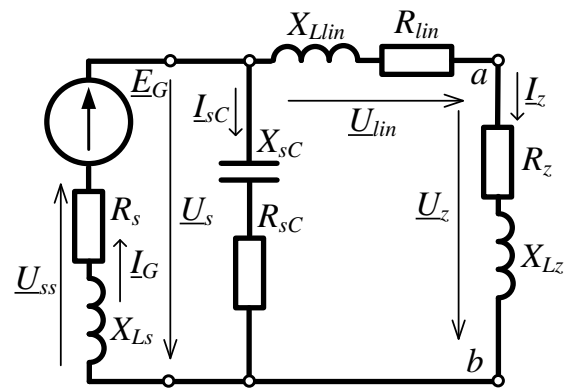


Рис. 5. Модель ЭЭС с СК параллельно генератору

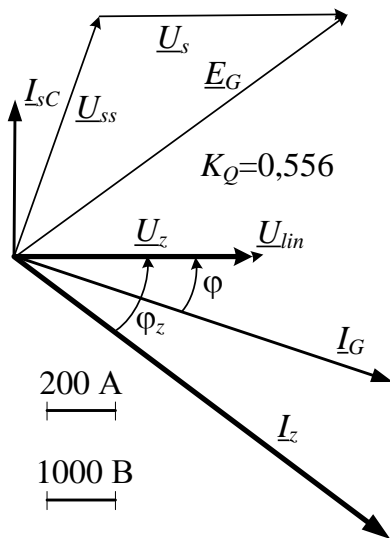


Рис. 6. Векторная диаграмма для ЭЭС с СК1 при $K_Q=0,556$

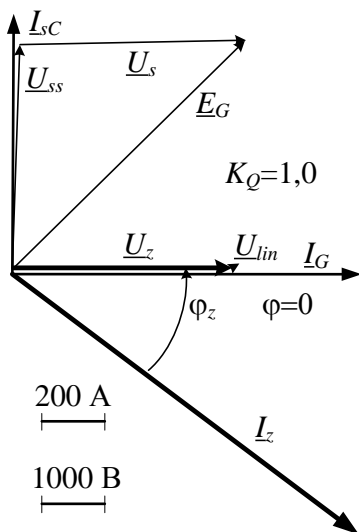


Рис. 7. Векторная диаграмма с СК2 для ЭЭС с полной компенсацией

На рис.6 между \underline{U}_z и \underline{I}_G фазовый сдвиг $\varphi=18,37^\circ$ – тогда коэффициент мощности потребителя совместно с конденсатором: $\cos\varphi=0,95$. На рис.7 получено $\varphi=0$ и $\cos\varphi=1$, т.е. полная компенсация реактивной мощности потребителя $Q_{Lz}=3 \cdot X_z \cdot I_z^2$ реактивной мощностью СК2 $Q_C=3 \cdot X_{sC} \cdot I_{sC}^2$ ($Q_{Lz}-Q_C=0$).

Однако повышение $\cos\varphi$ на 0,05 дается увеличением мощности СК2 вдвое, что является неоправданным, тогда как СК1 уже дает весьма заметные изменения в ЭЭС к лучшему. За 10 лет при работе СК1 в среднем 300 суток по 16 час будет сохранена электроэнергия $Wh=10 \cdot 300 \cdot 16 \cdot 252=12 \cdot 10^6$ кВт·час,

что при цене электроэнергии 0,3 грн/(кВт·ч) обеспечит сбережение около 3,6 млн. грн. Добавим, что уменьшение полной мощности генератора S_G с 15 до 12,6 МВ·А также даст сбережение капитальных затрат на электростанции. В целом установка СК1 у потребителя на предприятии будет оправдана, если связанные с этим расходы будут меньше, чем экономия на электроэнергии и генераторе.

Список литературы

1. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1984.–472 с.
2. Міліх В.І., Шавьолкін О.О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. За ред.В.І.Міліх. – К.: «Каравела»,2007.– 688 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Л: Энергия, 1978. – 832 с.

Аннотация

Рассмотрена модель простой электроэнергетической системы (ЭЭС), в которой электростанция представлена трехфазным синхронным генератором 15 МВ·А, потребитель электроэнергии – трехфазной нагрузкой 11,43 МВт, их соединяет трехфазная линия электропередачи 6,3 кВ.

С помощью электрических схем замещения проведен сравнительный расчетный анализ вариантов решения актуальной задачи – повышения коэффициента мощности ЭЭС посредством синхронного компенсатора (СК).

Расчеты проведены символическим методом и иллюстрируются векторными диаграммами. Сравнивались ЭЭС без СК и с СК 5 МВ·А и 10 МВ·А. Рассмотрены их включения параллельно потребителю и параллельно генератору при разных степенях компенсации реактивной мощности ЭЭС. Констатируется, что второй вариант по целому ряду параметров проигрывает. Выявлено, что рациональным является вариант СК при 5 МВ·А, так как удвоение мощности в СК, а, значит, габаритов и цены, не приносит столь же ощутимого уменьшения потерь мощности и полной мощности генератора по сравнению с исходной ЭЭС. Это оценено экономией электроэнергии за 10 лет работы.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, генератор, потребитель, линия электропередачи, повышение коэффициента мощности, синхронный компенсатор, способы включения, расчетный анализ, экономия электроэнергии.