

Богданов Евгений Петрович

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Доцент кафедры «Электромеханические комплексы и материалы»
Кандидат технических наук, доцент
Evgeny P. Bogdanov
National Research Tomsk Polytechnic University
Associate Professor of Department "Electromechanical Systems and Materials"
E-Mail: epbogdanov@mail.ru

Рикконен Сергей Владимирович

Национальный исследовательский Томский государственный университет
Ведущий инженер
Кандидат технических наук, доцент
Sergey V. Rikkonen
National Research Tomsk State University
Principal Engineer
E-Mail: Rikk2@yandex.ru

05.14.00 – Энергетика

**Компенсация реактивной мощности распределительной
сети станка-качалки**

Compensation of reactive power in distribution network of pumping unit

Аннотация: Обоснована необходимость применения в качестве привода штанговых глубинных насосных установок (ШГНУ) синхронного двигателя с регулированием возбуждения (СДРВ) с целью повышения энергоэффективности системы электроснабжения станков-качалок. СДРВ в режиме перевозбуждения в условиях переменной нагрузки позволяет поддерживать коэффициент мощности всей распределительной сети, близкий к единице, существенно повысить к.п.д. всей системы и снизить отклонения напряжения до допустимых значений.

Abstract: The necessity of application as a drive of sucker-rod pumps (SRP) of synchronous motor with field adjustment (SMFA) to improve the energy efficiency of the power supply system of pumping units is justified. SMFA in overdrive mode with variable load allows to maintain the power factor of the whole distribution network close to unity, significantly improve the efficiency of the whole system and to reduce the voltage fluctuation to acceptable values.

Ключевые слова: Электродвигатель; коэффициент; электрооборудование; насос; предприятие; возбуждение; сети; компенсатор.

Keywords: Electrical motor; coefficient; electrical equipment; pump; enterprise; excitation; grid; compensator.

Основные потери электроэнергии в энергетических системах электроснабжения предприятий приходится на распределительные сети напряжением 0,4 кВ [2,3].

Установка *компенсаторов реактивной мощности (КРМ)* на шинах 0,4 кВ трансформаторных подстанций 10(6)/0,4 кВ не приводит к значительному снижению потерь *активной мощности (АМ)* в распределительной сети 10(6)/0,4 кВ. Это может быть достигнуто только

при установке КРМ на вторичных вводных распределительных пунктах 0,38 кВ / 0,22 кВ (для США 0,46 кВ/0,23 кВ) в местах непосредственного потребления *реактивной мощности (РМ)*.

Повышение коэффициента мощности на 0,01 в сетях 10кВ(6кВ)/0,4кВ в России высвобождает мощности генераторов на электростанциях около 150 тыс.кВт. Если учесть, что для производства 1,314 млрд. кВт·ч электроэнергии нужно иметь около 0,44 млн. т условного топлива, которое необходимо получить из недр земли, затратить большой труд на добычу и доставку к электростанции, обеспечив выработку электроэнергии, то можно представить всю экономическую выгоду в экономике от уменьшения потребления РМ.

Повышенное потребление РМ из сети при низких значениях $\cos\phi$ вызывает необходимость увеличения сечений проводов и кабелей в электрических сетях для уменьшения потерь. При $\cos\phi \leq 0,7$ перерасход цветных металлов (меди и алюминия) составит более 50 %.

Низкий коэффициент мощности приводит к излишней загрузке понижающих подстанций передачей реактивной мощности, поэтому необходимо увеличивать мощность трансформаторов или их количество. Повышенная загрузка сетей реактивным током вызывает понижение напряжения в сети, а резкие колебания значения РМ – колебания напряжения в сети и, как следствие, ухудшение качества электроэнергии, отпускаемой потребителям.

Картина потерь существенно изменяется, если на предприятии имеются технологические процессы с переменным характером нагрузки [3].

Самым наглядным примером энергосистемы с переменной во времени нагрузкой является система энергоснабжения *станков-качалок (СК) со штанговыми глубинными насосными установками (ШГНУ)* [1,4].

Вследствие применения компенсирующих устройств на подстанции при неизменной мощности нагрузки реактивные мощности и ток в линии уменьшаются – линия разгружается по реактивной мощности. В линии уменьшаются потери мощности и потери напряжения.

$$\Delta P_{л} = \frac{P_{н}^2 + (Q_{н} - Q_{к})^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{л}, \text{ Вт}; \quad \Delta U_{л} = \frac{P_{н} \cdot R_{л} + (Q_{н} - Q_{к}) \cdot X_{л}}{U_{ном}}, \text{ В},$$

где $Q_{н}$ – реактивная мощность нагрузки, $Q_{к}$ – реактивная мощность компенсирующего устройства, $R_{л}$ – активное сопротивление фазы линии, $X_{л}$ – индуктивное сопротивление фазы линии.

Оптимальным местом расположения компенсирующих устройств являются шины подключения нагрузки.

Компенсирующим устройством может являться *синхронный двигатель с регулированием возбуждения (СДРВ)*, работающий на нагрузку и одновременно вырабатывающий реактивную мощность.

СДРВ с регулированием возбуждения несколько сложнее, чем асинхронный двигатель, но обладает рядом преимуществ, что позволяет применять его повсеместно вместо асинхронного двигателя.

1. Основное достоинство СДРВ – возможность получения оптимального режима по реактивной энергии, который осуществляется путем автоматического регулирования тока возбуждения двигателя. СДРВ может работать, не потребляя и не отдавая реактивной энергии в сеть, при коэффициенте мощности ($\cos\phi$), равном единице. Если для предприятия необходима выработка реактивной энергии, то СДРВ, работая с перевозбуждением, может отдавать её в сеть (рис.1).

2. СДРВ имеют более высокий к.п.д. по сравнению с асинхронным двигателем.
3. СДРВ менее чувствительны к колебаниям напряжения сети, чем асинхронные электродвигатели. Их максимальный момент пропорционален напряжению сети, в то время как критический момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения.
4. СДРВ имеют высокую перегрузочную способность. Кроме того, перегрузочная способность СДРВ может быть автоматически увеличена за счет повышения тока возбуждения, например, при резком кратковременном повышении нагрузки на валу двигателя.
5. Скорость вращения СДРВ неизменна при любой нагрузке на валу в пределах его перегрузочной способности.
6. За счет отсутствия реактивных токов в распределительной системе энергоснабжения существенно снижаются потери напряжения у потребителя, особенно в переходных режимах.
7. СДРВ могут выполнять роль стабилизаторов напряжения. При их суммарной мощности около 40 % общей мощности нагрузки регулированием возбуждения можно стабилизировать напряжение сети при 2-3 кратной перегрузке асинхронных двигателей.

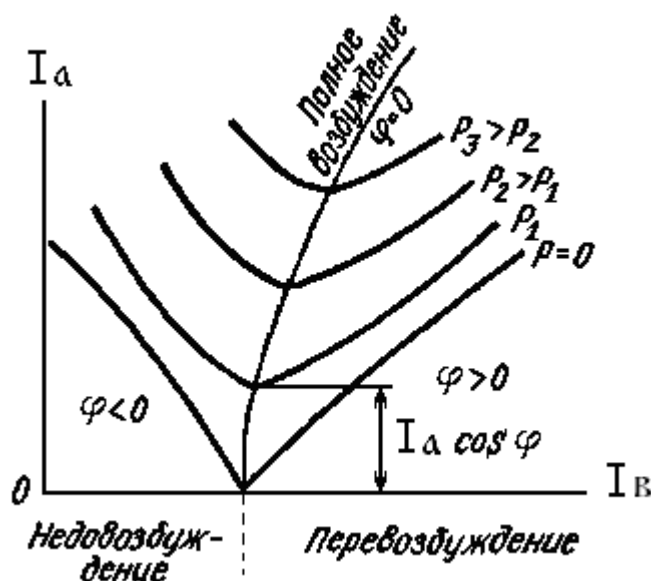


Рис. 1. U - образные характеристики синхронной машины переменного тока

Оптимальная величина генерированной реактивной мощности СДРВ должна определяться технико-экономическими расчетами с учетом активной нагрузки СДРВ и реактивной нагрузки сети потребителя, теплового режима и потерь активной мощности в СДРВ. Критерием определения границы целесообразности использования СДРВ для КРМ являются приведенные затраты, которые учитывают стоимость дополнительных потерь мощности в СДРВ от генерации реактивной мощности $\Delta Q_{дрв}$, а также стоимость конденсаторных батарей (КБ), потерь активной мощности в конденсаторах, эксплуатационные затраты, то есть суммарные затраты на КРМ с помощью КБ. Также возможность использования СДРВ для КРМ должна проверяться по условиям нагрева обмоток соответственно ротора и статора.

Основное назначение синхронных двигателей – выполнение механической работы, следовательно, он является потребителем активной мощности. При перевозбуждении СДРВ

его э.д.с. больше напряжения сети, в результате вектор тока статора опережает вектор напряжения, т. е. имеет емкостной характер, а СДРВ выдают реактивную мощность. При недовозбуждении СДРВ является потребителем реактивной мощности. При некотором режиме возбуждения СДРВ его коэффициент мощности равен единице (рис.1). Изменение тока возбуждения позволяет плавно регулировать генерируемую СДРВ реактивную мощность. Затраты на генерацию двигателями реактивной мощности определяются в основном стоимостью связанных с этим потерь активной мощности в самом двигателе. Потери активной мощности в СДРВ зависят от генерируемой ими реактивной мощности, причем, чем меньше номинальная мощность СДРВ и его частота вращения, тем больше эти потери. Для быстроходных СДРВ удельный расход активной мощности составляет около 10 Вт/кВАр; для СДРВ с частотой вращения 300÷500 об/мин – около 20÷30 Вт/кВАр; для СДРВ с частотой вращения 50÷100 об/мин - около 60÷85 Вт/кВАр.

Следовательно, маломощные двигатели с малой частотой вращения неэкономичны в качестве источника РМ.

В качестве источника РМ можно использовать СДРВ на номинальное напряжение 0,4 кВ, недогруженные по активной мощности и имеющие частоты вращения 1000÷3000 об/мин.

Значения реактивной мощности, которую можно получить от СДРВ, зависят от его загрузки активной мощностью и напряжения на зажимах двигателя.

Распределительная сеть с асинхронными приводами и с синхронными приводами, работающими в режиме компенсации РМ

Коэффициент мощности и к.п.д. двигателей существенно зависят от степени загрузки привода, при этом потери в двигателях и распределительной сети также существенно изменяются [3].

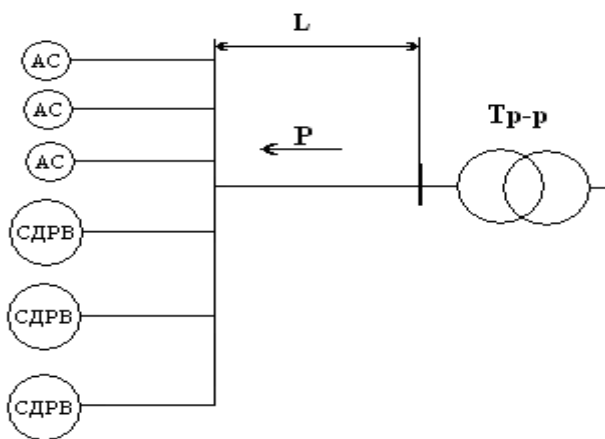


Рис. 2. Схема распределительной сети станков-качалок с асинхронными приводами и с СДРВ, работающими в режиме компенсации РМ. Коэффициент мощности распределительной сети $\cos\varphi = 1$

Асинхронный двигатель: $P_{ад} = 22$ кВт; $U_{л} = 380$ В; $\eta_{ад} = 90,5$ %; $\cos\varphi = 0,78$; $n = 1500$ об/мин. Потери в такой схеме складываются из потерь от АМ и РМ. Потери разделяются на потери в приводе и потери в распределительной сети. Суммарная мощность асинхронных двигателей $P_{\Sigma ад} = 3 \times 22 = 66$ кВт. Полная мощность $S = 84,6$ кВА. Реактивная мощность $Q = 52,9$ кВАр.

Синхронный двигатель с регулированием возбуждения: $P_{сд} = 22$ кВт; $U_{л} = 380$ В; $\eta_{сд} = 93,0$ %; $\cos\varphi = 0,78$; $n = 1500$ об/мин. Суммарная мощность синхронных двигателей $P_{\Sigma сд} = 3 \times 22 = 66$ кВт. Полная мощность $S = 84,6$ кВА. Реактивная мощность $Q = 52,9$ кВАр.

Длина линии от нагрузки до трансформаторной подстанции $L = 500$ м.

Активное сопротивление фазы линии $R_{л} = 0,094$ Ом. Индуктивное сопротивление фазы линии $X_{л} = 0,15$ Ом.

Характер нагрузки приводов станков-качалок переменный, двигатель периодически работает в номинальном режиме.

Рассмотрим самый тяжелый с энергетической точки зрения, случай, когда все шесть приводов работают синхронно и синфазно.

Энергетические параметры двигателей (к.п.д. и коэффициент мощности) существенно зависят от величины нагрузки двигателя [3].

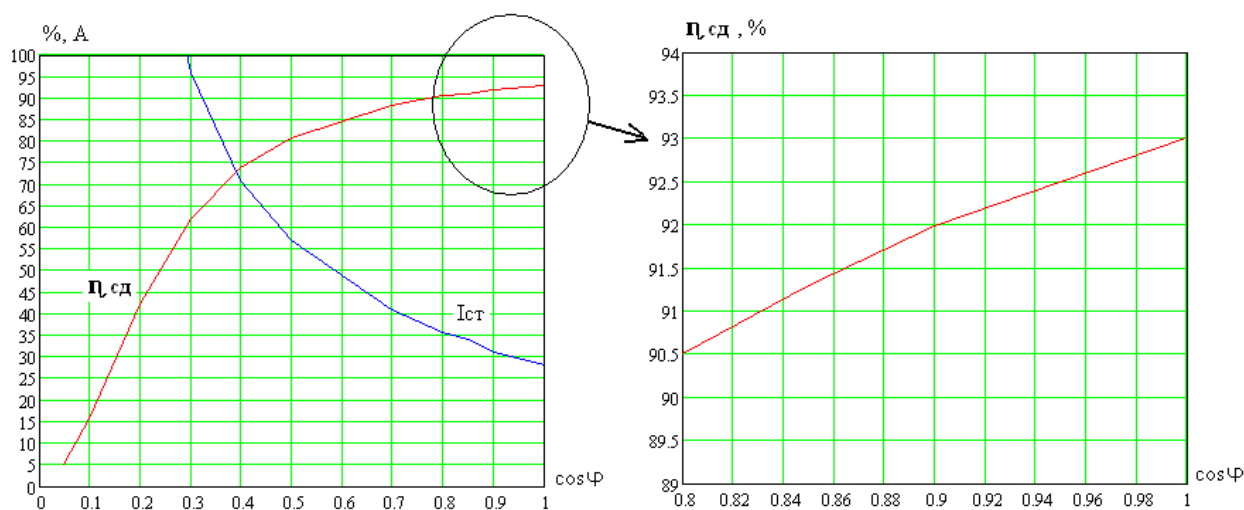


Рис. 3. Зависимость к.п.д. и тока статора СДРВ от изменения коэффициента мощности ($\cos\varphi$)

В этом случае СДРВ компенсируют РМ асинхронных двигателей. Потерь мощности от РМ в сети нет. Но к.п.д. и $\cos\varphi$ асинхронных приводов остались прежними. СДРВ, работающие в режиме перевозбуждения, имеют $\cos\varphi$ не выше, чем асинхронные двигатели. При этом к.п.д. СДРВ снижается в зависимости от снижения $\cos\varphi$ и равен 90,0 % (рис. 3).

Следовательно, потери в сети от РМ уменьшились, а в нагрузке потери от РМ остались прежними.

Такая же энергетическая картина будет и при установке одного СДРВ, работающего только в режиме генерации реактивной мощности, равной РМ всех асинхронных двигателей, поддерживая коэффициент мощности сети равным единице ($\cos\varphi = 1$).

Среднее значение потерь активной мощности системы электроснабжения куста с шестью станками-качалками составляет $\Delta P_{ср} = 17,0$ кВт. В год $\Delta W = \Delta P_{ср} \times 8760 = 148920$ кВт·час. К.п.д. системы составляет 88,59 %.

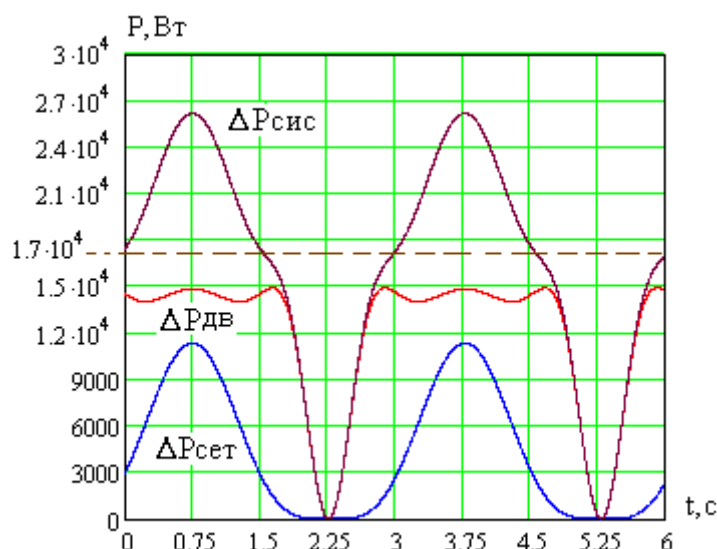


Рис. 4. Временная зависимость потерь активной мощности СДРВ, распределительной сети и системы в целом с учетом нелинейной зависимости к.п.д. от нагрузки ($\cos\varphi = 1$)

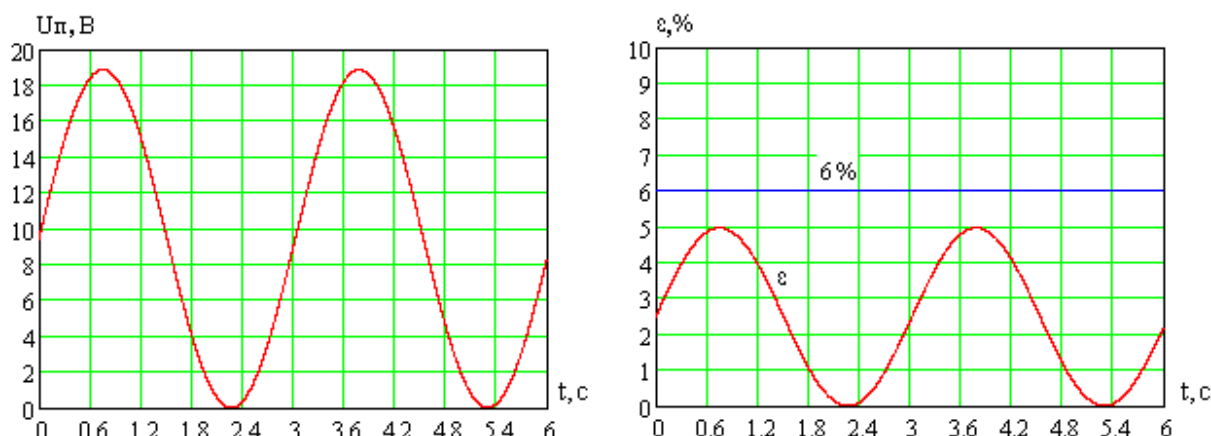


Рис. 5. Временная зависимость потерь напряжения в воздушной распределительной линии

Потери напряжения в распределительной линии при переменной нагрузке электрических приводов ШГНУ и наличии трех СДРВ, работающих в режиме компенсаторов реактивной мощности [3].

Допустимые отклонения напряжения 4÷6 %. При отклонениях напряжения выше 6 % целесообразно применять средства компенсации реактивной мощности системы или регулировать напряжение на низкой стороне трансформатора, что существенно увеличивает капитальные затраты на сооружение всей системы.

В случае работы СДРВ в качестве работающего двигателя и компенсатора реактивной мощности можно добиться, что отклонения напряжения на нагрузке будут ниже допустимых значений, в данном примере отклонение напряжения не превышает 5 %.

Выводы

1. Синхронный двигатель с регулируемым возбуждением по сравнению с асинхронным двигателем имеет ряд преимуществ. Целесообразно применять СДРВ в технологических процессах, где имеется переменный момент нагрузки.
2. В качестве источника РМ можно использовать СДРВ на номинальное напряжение 0,4 кВ, недогруженные по активной мощности и имеющие частоты вращения 1000÷2000 об/мин.
3. Применение СДРВ в качестве работающего двигателя и компенсатора реактивной мощности для распределительной сети позволяет существенно снизить потери системы, снизить отклонения напряжения до допустимых значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блантер С.Г., Суд И.И. Электрооборудование для нефтяной промышленности. Изд. «Недра». - М. 1973. С. 242-252.
2. Богданов Е.П., Рикконен С.В., Федянин А.Л. Повышение энергоэффективности распределительных сетей промышленных предприятий и объектов ЖКХ [Электронный ресурс] // Наукоедение. - 2013 - №. 1. - С. 1-8. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/64tvn113.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
3. Богданов Е.П., Рикконен С.В., Номоконова Ю.А. Потери мощности предприятия при переменной нагрузке [Электронный ресурс] // Наукоедение. - 2013 - №. 3. - С. 1-7. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/09tvn313.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
4. Литвак В.В. Реформирование электроэнергетики России и эффективное энергосбережение//itech – журнал интеллектуальных технологий. - 2011. - № 18. - С. 64-66.

Рецензент: Лукутин Борис Владимирович. Докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Национального исследовательского Томского политехнического университета.