

И. В. ВЛАСЮК, аспирант

С. Ю. ПАРАМОНОВ, магистрант

С. И. БЕЛОВ, канд. техн. наук, доцент, научный руководитель

Институт механики и энергетики имени В. П. Горячкина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная

академия имени А. К. Тимирязева», Российская Федерация, г. Москва

I. V. VLASYUK, Postgraduate student

S. Yu. PARAMONOV, Undergraduate

S. I. BELOV, Ph. D. Of Engineering, Associate Professor, Scientific Adviser

Institute of Mechanics and Power named after V. P. Goryachkin

Federal State budgetary Educational Institution of Higher Professional Education

"Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev",

Russian Federation, Moscow

ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ АПК

THE INFLUENCE OF REACTIVE POWER COMPENSATION ENERGY SAVING OF AGRICULTURAL ENTERPRISES

Аннотация. На фоне общего электропотребления наблюдается тенденция устойчивого роста использования электроэнергии не только в коммунально-бытовом секторе села, но и производственными объектами агропромышленного комплекса страны, учитывая государственные программы развития сельского хозяйства и, как следствие, образование крупных комплексов производства сельскохозяйственной продукции. В статье рассматривается актуальность экономии использования электроэнергии в сельском хозяйстве и вопрос о компенсации реактивной мощности. Проведен обзор решения проблематики компенсации реактивной мощности как в России и бывшем СССР, так и в ряде других стран. Так как в настоящее время прирост потребления реактивной мощности превышает рост потребления активной мощности, которое связано не только с применением большего количества электроприводов и других приемников реактивной энергии для автоматизации процесса производства, но и с бурным развитием новых частотных преобразователей для электроприводов, выполняется постановка проблематики сниженной энергоэффективности систем электроснабжения и причин потерь в электроэнергии. Представлен обзор стратегии развития систем электроснабжения, в том числе сельского хозяйства, и поиск решений повышения эффективности функционирования электроустановок. Проведен анализ существующих решений по компенсации реактивной мощности и определена наиболее целесообразная для применения в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Рассмотрен вопрос применения конденсаторных батарей в качестве основных источников реактивной мощности, служащих для снижения потерь электроэнергии у сельскохозяйственных потребителей.

Ключевые слова: энергосбережение предприятий АПК, энергоэффективность сельских электрических сетей, потери в сельских электрических сетях, компенсация реактивной мощности, компенсирующие устройства реактивной мощности, конденсаторные батареи.

Abstract. Against the background of the General power consumption, there is a trend of sustainable growth in the use of electricity not only in the communal sector of the village, but also in the production facilities of the agro-industrial complex of the country, taking

into account the state programs for the development of agriculture and, as a consequence, the formation of large complexes of agricultural production. The article considers the relevance of saving energy in agriculture and the question of compensation of reactive power. A review of the problem of compensation of reactive power in Russia and the former USSR, and in a number of other countries and States. As at present, the increase in reactive power consumption exceeds the increase in the consumption of active power, which is concerned not only with the use of a larger number of actuators and other sinks of reactive power for the automation of the production process, but with the rapid development of new frequency converters for electric drives, runs the statement of issues reduced energy efficiency of power supply systems and causes losses of electricity. The review of the strategy of development of power supply systems, including agriculture, and the search for solutions to improve the efficiency of electrical installations. The analysis of the existing solutions for reactive power compensation and determined the most appropriate for use in the power supply system of agricultural consumers. The article considers the use of capacitor banks as the main sources of reactive power, serving to reduce power losses in agricultural consumers.

Keywords: *energy saving of agricultural enterprises, energy efficiency of rural electric networks, losses in rural electric networks, reactive power compensation, compensating reactive power devices, capacitor batteries.*

Сегодня весьма актуальным является вопрос экономного использования электроэнергии в агропромышленном комплексе. Снижение курса рубля по отношению к иностранной валюте и санкции против России со стороны США и Европы создают уникальную возможность заняться импортозамещением в сельском хозяйстве. Президент России Владимир Путин распорядился продлить контрсанкции, введенные Указом от 6 августа 2014 года «О применении отдельных специальных экономических мер в целях обеспечения безопасности Российской Федерации» [1]. Документ запрещает в течение установленного периода ввозить в Россию сельхозпродукцию, сырье и продовольствие из стран, присоединившихся к санкциям против Российской Федерации.

Кризисные явления, которые наблюдаются в настоящее время в российской экономике, вынуждают предприятия агропромышленного комплекса резко ускорить развитие. Это достигается, главным образом, за счет увеличения мощностей сельскохозяйственных предприятий по импортозамещению. Россия способна сама себя обеспечивать сельскохозяйственной продукцией, потому что имеет немалый аграрный потенциал.

Экономное использование электроэнергии в агропромышленном комплексе невозможно без применения энергосберегающих технологий. Повышение уровня

экономичности электроснабжения в сельском хозяйстве – это и комплексная задача. С этим вопросом тесно связаны проблемы улучшения качества и усиления надежности электроснабжения. Особое внимание необходимо уделять снижению потерь электроэнергии, а также разработке мероприятий по ее рациональному использованию.

Важнейшим фактором для внедрения перспективных программ сбережения выступает разработка оптимального плана, предполагающего замену давно эксплуатируемых энергетических установок. Многие из них работают на предприятиях более 25 лет. Устаревшее оборудование не отличается высокой мощностью, востребованной сегодня. Линии электропередач (ЛЭП) 0,4...10 кВ находятся на балансе электросетевых компаний, 0,4 кВ – остались на балансе в лишь единичных многопрофильных сельхозпредприятиях. Сельхозпотребители получают электропитание, в основном, по 3-й категории надежности снабжения потребителя электрической энергией, т. е. по радиальным линиям электропередачи и не имеют резервного питания, за некоторым исключением построенных новых или реконструированных крупных производственных предприятий-комплексов 2-й и 1-й категорий надежности.

В связи с тем, что электрические сети на сельских территориях за последние десятилетия практически не обновлялись, тех-

ническое состояние их резко ухудшилось. В распределительных сетях 0,4/10 кВ теряется более 15 % электрической энергии. Имеют место частые отключения электроэнергии по причине выхода из строя линий электропередач, недогрузка линий электропередач и трансформаторных подстанций. Повышенные потери электроэнергии в этих случаях оплачивают сельхозпроизводители.

Учитывая неудовлетворительное состояние электрических сетей на 0,4...10 кВ, сельхозпотребители во многих хозяйствах получают электроэнергию по качеству, не соответствующему ГОСТ 32144–2013. Из-за этого силовые трансформаторы и электродвигатели перегреваются и выходят из строя даже при минимальной нагрузке, защита электросети не срабатывает, на нулевом проводе возникает опасное напряжение, и наблюдаются другие опасные ситуации. Проблема давно эксплуатируемых электроустановок также значительно замедляет развитие современного агропромышленного комплекса. Замена устаревшего оборудования на более современное в большинстве случаев требует серьезных финансовых вложений. В такой ситуации основной задачей предприятия выступает снижение потерь электроэнергии в имеющихся электроустановках.

Проводимая концепция развития электрических сетей до 2020 года [2] предполагала применять на воздушных линиях напряжением 0,4 кВ самонесущие изолированные провода (СИП) с одинаковым сечением по магистрали. Сечение проводов на магистральных линиях должно быть не менее 70 мм² (по алюминию). Это означает, что для увеличения пропускной способности необходимо демонтировать старые линии и на их месте спроектировать и смонтировать более мощные электрические сети, что приведет, в конечном счете, к удорожанию электроэнергии и, как следствие, к росту себестоимости сельхозпродукции.

Грамотное производство, передача и использование электроэнергии для обеспечения бесперебойного процесса производства сельскохозяйственной продукции осуществляется по нескольким направлениям. Одним из направлений повышения энергоэффективности и снижения потерь электроэнергии является компенсация реактивной мощности.

На экономичность передачи электроэнергии заметное влияние оказывает наличие баланса реактивной мощности в узлах. Кроме активной мощности, многие электроприемники потребляют значительное количество реактивной мощности. Основными ее потребителями являются асинхронные двигатели (60...65 % общего потребления), трансформаторы (20...25 %), вентильные преобразователи, реакторы, воздушные электрические сети и прочие приемники (10 %) [3].

В стратегии развития электросетевого комплекса РФ, разработанной на период до 2030 года, указано, что под повышением энергетической эффективности электрических сетей необходимо понимать не только снижение потерь в сетях, но и повышение надежности и качества электроснабжения, а также повышение пропускной способности сетей для обеспечения недискриминационного доступа потребителей к сетям [4]. Эти показатели технологически тесно связаны между собой.

Дополнительные к оптимальным потоки реактивной мощности в электрических сетях приводят к увеличению полного тока на отдельных участках и к соответствующему росту потерь напряжения, потерь мощности и электроэнергии, снижению пропускной способности линий и нагрузочной способности трансформаторов. Помимо этого, увеличившиеся потоки реактивной мощности в линиях электропередач не позволяют пропускать активную мощность, на которую данные линии рассчитаны. В конечном итоге все это отрицательно сказывается на экономике электросетевых предприятий и тарифах на электроэнергию для конечных потребителей.

Учитывая сравнительно высокую экономическую и энергетическую эффективность компенсации реактивной мощности, большинство промышленно развитых стран уделяют ей большое внимание. В частности, в США и Японии мощность конденсаторов составляет около 70 % от активной пиковой мощности. В отдельных энергокомпаниях США мощность установленных конденсаторов уже составляет 100 % от мощности генераторов. При этом во многих странах наблюдается тенденция уменьшения выдачи генераторами электростанций реактивной мощности за счет увеличения доли, выраба-

тываемой конденсаторами.

Что касается коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\phi$ в режиме максимальных нагрузок, то в США, Японии, большинстве европейских стран его оптимальное значение в зависимости от номинального напряжения сети должно поддерживаться на уровне $\text{tg}\phi = 0,2 \dots 0,4$, что соответствует $\cos\phi = 0,98 \dots 0,92$.

В ряде стран в системе расчета тарифов на мощность или электроэнергию с целью стимулирования установки компенсирующих устройств введены поправочные коэффициенты, зависящие от коэффициента мощности нагрузки. В частности, в Индии при $\cos\phi > 0,995$ вводится скидка 7 %, при $\cos\phi < 0,9$ вводится штраф 2 %. Кроме этого, существуют две составляющие тарифа – за активную и полную потребленную энергию. Чем ближе $\cos\phi$ к единице, тем меньше полная потребляемая мощность при той же активной мощности и, соответственно, плата за нее.

Следует заметить, что повышенное внимание за рубежом уделяется не только установке достаточного количества компенсирующих и регулирующих устройств, но и автоматизации систем регулирования напряжения и управления потоками реактивной мощности. В частности, широко известен опыт Франции и Италии по внедрению трехконтурных автоматизированных систем, основанных на разбиении электроэнергетических систем этих стран на зоны управления. Работа по такому внедрению во Франции, в частности, началась еще в 1979 году.

В бывшем СССР в течение длительного времени (с 30-х годов прошлого века и до 1990 года) взаимоотношения энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии в части реактивной мощности также регулировались скидками (надбавками) к тарифам на электроэнергию.

За период с 1976 по 1985 год уровень компенсации увеличился с 19,54 до 27,6 %. Ставилась задача к 1990 году довести его до 60 %, но началась перестройка и намеченные планы так и не удалось реализовать [5].

В постперестроечный период, особенно в соответствии с приказом Минэнерго РФ от 10.01.2000 года № 2, действующие в области компенсации реактивной мощно-

сти документы были признаны утратившими силу и внимание к этой важнейшей проблеме существенно снизилось. За тот же период по ряду объективных причин значительно выросли реактивные нагрузки при существенном отставании вводов генерирующих активных мощностей и электросетевого строительства, в том числе в агропромышленном комплексе. Появилось большое количество энергорайонов России, характеризующихся дефицитами реактивной мощности и, как следствие, работой с пониженными уровнями напряжения в нормальных режимах.

На сегодняшний день создана нормативная база для определения мест и установленной мощности компенсирующих устройств при разработке схем развития электрических сетей, проектов их реконструкции и присоединения новых потребителей электроэнергии, а также для стимулирования к установке средств компенсации в системообразующих и распределительных электрических сетях и в сетях потребителей.

Компенсация реактивной мощности – процесс снижения реактивной составляющей мощности в точках электрической сети различными способами и с применением специальных технических средств.

Снижение реактивной мощности питающих сетей, как правило, улучшает технико-экономические показатели системы электроснабжения, одновременно улучшается и качество электроэнергии у потребителей.

Снижение реактивной мощности может решаться как изменением параметров элементов основного оборудования сети, так и применением специальных компенсирующих устройств. При этом использование КУ в большинстве случаев оказывается более эффективным и экономичным.

Для обеспечения компенсации реактивной мощности в любой точке электрической сети применяются компенсирующие устройства.

На предприятиях в основном используется два типа источников реактивной мощности: синхронные двигатели и батареи конденсаторов.

Синхронные двигатели применяются на предприятиях в случаях, когда по электромеханическим условиям выбора

электропривода синхронный двигатель равноценен асинхронному двигателю при мощности привода более 200 кВт. Основные достоинства синхронного двигателя: возможность плавного регулирования реактивной мощности без искажения формы питающего тока, высокая устойчивость обмоток при коротких замыканиях, ремонтно-пригодность.

Однако использование синхронного двигателя в качестве компенсатора реактивной мощности экономически оправдано, только если они используются в технологическом процессе, так как они имеют ряд недостатков.

К недостаткам синхронного двигателя следует отнести следующие: значительные потери активной мощности при полной нагрузке, высокую стоимость, значительные эксплуатационные расходы, ограничение по возможной генерируемой реактивной мощности, низкое быстродействие, сложность конструкции. На сельскохозяйственных предприятиях применение синхронных двигателей в качестве компенсации реактивной мощности нецелесообразно.

В качестве основного источника реактивной мощности, служащего для обеспечения сельскохозяйственных потребителей реактивной мощностью, сверх того количества, которое возможно и целесообразно получить от энергосистемы, применяются конденсаторные батареи. Они устанавливаются как в сетях с напряжениями 6...10 кВ, так и в сетях с напряжениями 660 и 380 В. Они предпочтительнее электромашинных способов компенсации по показателям удельных затрат, имеют эксплуатационное и технологическое преимущество и сравнительно низкую стоимость.

Преимуществами использования конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности являются:

- малые удельные потери активной мощности (собственные потери современных низковольтных косинусных конденсаторов не превышают 0,5 Вт на 1 квар);
- отсутствие вращающихся частей;
- простой монтаж и эксплуатация (не нужно фундамента);
- относительно невысокие капиталовложения;
- возможность подбора практически лю-

- бой необходимой мощности компенсации;
- возможность установки и подключения в любой точке сети;
- отсутствие шума во время работы;
- небольшие эксплуатационные затраты.

Большинство потребителей электроэнергии таких предприятий представляют собой электрические машины, трансформаторы, оборудование для дуговой сварки, в которых переменный магнитный поток связан с обмотками. Вследствие этого в обмотках при протекании переменного тока индуцируются реактивные э.д.с., обуславливающие сдвиг по фазе (ϕ) между напряжением и током. Этот сдвиг по фазе обычно увеличивается, а $\cos\phi$ уменьшается при малой нагрузке. Например, если $\cos\phi$ двигателей переменного тока при полной нагрузке составляет 0,75...0,80, то при малой нагрузке он уменьшится до 0,20...0,40. Малонагруженные трансформаторы также имеют низкий $\cos\phi$. Результирующий $\cos\phi$ энергетической системы будет низок и ток нагрузки электрической, без компенсации реактивной мощности, будет увеличиваться при одной и той же потребляемой из сети активной мощности. Соответственно, при компенсации реактивной мощности (применении автоматических конденсаторных установок КРМ) ток, потребляемый из сети, снижается, в зависимости от $\cos\phi$ на 30...50 %, соответственно, уменьшается нагрев проводящих проводов и старение изоляции.

Необходимо напомнить, что конденсаторные установки, используемые в электроэнергетике, должны быть автоматизированными, при этом:

- автоматически отслеживается изменение реактивной мощности нагрузки в компенсируемой сети и, в соответствии с заданным, корректируется значение коэффициента мощности $\cos\phi$;
- исключается генерация реактивной мощности в сеть;
- исключается появление в сети перенапряжения, так как нет перекомпенсации, возможной при использовании нерегулируемых конденсаторных установок;
- визуально отслеживаются все основные параметры компенсируемой сети;
- контролируется режим эксплуатации и работа всех элементов конденсаторной

установки;

предусмотрена система аварийного отключения конденсаторной установки и предупреждения обслуживающего персонала;

возможно автоматическое подключение принудительного обогрева или вентиляции конденсаторной установки.

Таким образом, конденсаторные установки применяются не только для того, чтобы замедлить вращение счетчика реактивной энергии, их применение позволяет решить ряд других проблем, возникающих на производстве:

снизить загрузку силовых трансформаторов (при снижении потребления реактивной мощности снижается потребление полной мощности);

обеспечить питание нагрузки по кабелю с меньшим сечением (не допуская перегрева изоляции);

за счет частичной токовой разгрузки силовых трансформаторов и питающих кабелей подключить дополнительную нагрузку;

позволяет избежать глубокой просадки напряжения на линиях электроснабжения удаленных потребителей (водозаборные скважины, карьерные экскаваторы с электроприводом, стройплощадки и т. д.);

максимально использовать мощность автономных дизель-генераторов (судовые электроустановки, электроснабжение геологических партий, стройплощадок, установок разведочного бурения и т. д.);

облегчить пуск и работу двигателя (при индивидуальной компенсации).

При выборе конденсаторной установки требуемая мощность конденсаторов может определяться как [6]:

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (1)$$

где $\operatorname{tg}\varphi_1$ – коэффициент реактивной мощности до установки компенсирующих устройств; $\operatorname{tg}\varphi_2$ – коэффициент реактивной мощности после установки компенсирующих устройств, желаемый или задаваемый энергосистемой коэффициент.

При отсутствии компенсации реактивной мощности потребитель несет дополнительные затраты за потребление реактивной энергии в размере 30...40 % общей стоимости.

Соответственно, при компенсации реактивной мощности ток, потребляемый из сети, снижается, в зависимости от $\cos\varphi$, на 30...50 % уменьшается нагрев проводящих

проводов и старение изоляции. Повсеместная компенсация реактивной мощности, нагрузок в значительной степени поможет решить задачу пропускной способности сети, снизить потери электроэнергии в подводящих питающих линиях и трансформаторах, повысить напряжение сети и улучшить качество электроэнергии за счет фильтрации гармоник и импульсных помех. Применение конденсаторных установок позволит потребителям получать при той же полной мощности трансформатора большую полезную мощность при том же сечении кабелей и номиналах трансформаторов.

Компенсацию реактивной мощности можно отнести к энергосберегающим технологиям. Повышение $\cos\varphi$ позволяет уменьшить потребление из сети активной и реактивной энергии и увеличить за счет разгрузки по мощности срок службы оборудования.

Большое значение имеет правильный выбор места установки компенсирующего устройства. Существует общее правило: реактивную мощность надо компенсировать в месте ее возникновения.

В большинстве случаев стоимость оборудования по компенсации реактивной мощности окупается в течение нескольких месяцев. Прежде чем приступать к внедрению конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности на предприятии, необходимо провести измерения и анализ параметров сети: активную, реактивную, полную мощность, величину и уровни гармоник тока и напряжения, провалы и перенапряжения в линии, фликеры.

Выводы

1. В условиях санкций против России актуальна проблема экономного использования электроэнергии в агропромышленном комплексе.

2. Экономное использование электроэнергии в агропромышленном комплексе невозможно без применения энергосберегающих технологий.

3. Компенсация реактивной мощности – один из способов энергосберегающих технологий.

4. Батареи конденсаторов – один из способов обеспечения компенсации реактивной мощности в любой точке электрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 6 августа 2014 года № 560 «О применении отдельных специальных экономических мер в целях обеспечения безопасности Российской Федерации» Система ГАРАНТ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://base.garant.ru>.
2. Концепция устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.11.2011 года № 2136-р // Сборник законодательства РФ. 2011. № 50. Ст. 6748.
3. **Перова М. Б.** Качество сельского электроснабжения: комплексный подход. Вологодский технический университет, 1999. 72 с.
4. Распоряжение Правительства РФ от 03.04.2013 года № 511-р «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса РФ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.consultant.ru>.
5. **Воротницкий В. Э.** Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях // Проблемы и пути решения. Информационно-аналитический журнал «Энергосовет». 2017. № 47.
6. **Иванов В. С., Соколов В. И.** Режимы потребления и качества электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М. : Энергоатомиздат, 1987. 336 с.

REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation of August 6, 2014 № 560 "on the application of certain special economic measures to ensure the security of the Russian Federation" GUARANTOR System [Electronic resource]. Access mode: <http://base.garant.ru>
2. The concept of sustainable development of rural areas of the Russian Federation for the period up to 2020. Approved by the decree of the Government of the Russian Federation from 30.11.2011, № 2136-R // Collection of legislation of the Russian Federation. 2011. №. 50. St. 6748.
3. **Perova M. B.** Quality of rural power supply: an integrated approach. Vologda technical University, 1999. 72 s.
4. Order of the Government of the Russian Federation dated 03.04.2013 № 511-R "on approval of the development Strategy of the Russian electric grid complex" [Electronic resource]. Access mode: <http://www.consultant.ru>
5. **Vorotnitsky V. E.** Energy efficiency and reactive power compensation in electric networks // Problems and solutions. Information and analytical journal "Energosovet". 2017. №. 47.
6. **Ivanov V. S., Sokolov V. I.** Modes of consumption and quality of electricity supply systems of industrial enterprises. M. : Energoatomizdat, 1987. 336 s.

Власюк Иван Владимирович, аспирант, ассистент

Тел. 8-965-302-13-56

E-mail: 89653021356@yandex.ru

Парамонов Сергей Юрьевич, магистрант

Тел. 8-985-760-52-37

E-mail: baykal578@yandex.ru

Белов Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент, научный руководитель

Тел. 8-915-247-50-17

E-mail: sbelov_@mail.ru