*УДК 621.316.1*

***Хижняк Юрий Владимирович***
***Запорожский Национальный Технический Университет***
***Инженер-конструктор (электрические машины)***

# МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

***Аннотация:*** *В статье рассмотрены методы по повышению КПД электроустановок, приведен анализ существующих методик, их преимущества и недостатки. Рассмотрены теоретические и практические принципы повышения коэффициента мощности. Сделан вывод о необходимости повышения коэффициента мощности. Даны рекомендации по эффективности мер повышения коэффициента мощности.*

***Ключевые слова:*** *КПД, коэффициент мощности, энергетика, электроустановки, электрические машины*

***Annotation:*** *The article discusses methods for improving the efficiency of electrical installations, provides an analysis of existing methods, their advantages and disadvantages. The theoretical and practical principles of increasing the power factor are considered. The conclusion is made about the need to increase the power factor. Recommendations on the effectiveness of measures to increase the power factor are given.*

***Keywords:*** *efficiency, power factor, power engineering, electrical installations, electric machines*

Коэффициент полезного действия электроустановок, или КПД, напрямую связан с соотношением активной и реактивной составляющей потребляемой мощности. Это соотношение выражается через коэффициент мощности сети, поэтому повышение коэффициента мощности сети напрямую

связано с повышением КПД электроустановок. Большинство современных потребителей электрической энергии имеют индуктивный характер нагрузки, токи которой отстают по фазе от напряжения источника, что негативно сказывается на итоговом коэффициенте мощности электрической сети. При этом, наиболее распространенные потребители электрической энергии, представленные в электрических сетях, потребляют не только активную мощность для формирования полезной нагрузки, но и реактивную мощности для создания электромагнитных полей. Наиболее характерным потребителем в этом случае является асинхронный электропривод, выступающий в качестве основы большинства электроустановок современной промышленности РФ [1]. В процессе своей работы асинхронный привод потребляет 60-65% реактивной мощности сети. В зависимости от загруженности данного типа привода меняется потребление активной и реактивной мощности сети что выражается через коэффициент мощности сети. При возрастании реактивной составляющей данный коэффициент падает ниже идеального значения, что выражается в снижении эффективности преобразования электроэнергии так как часть энергии будет тратиться на преобразование в реактивную мощность, не идущую на формирования полезной работы. Кроме того, проблему расхода электроэнергии на намагничивание, т.е. роста реактивной мощности в сети усугубляет то, что это может быть вызвано не только сдвигом фаз между напряжением и током на выводах нагрузки, но и появлением высших гармоник в сети. Проблема гармонических искажений, формирующихся в сети вызвана все большим распространением преобразовательной техники и применением систем ПЧ-АД. Однако, замена АД не сможет решить проблемы снижения коэффициента мощности сети так как существуют иные источники реактивной мощности.

Ввиду того что снижение коэффициента мощности происходит не только в рамках локального предприятия в пределах всей энергосистемы, контроль качества коэффициента мощности ложится на всех участников

энергетической сети от генерирующих компаний до потребителей. Для этого существует множество методов и нормативов [2], однако, они могут варьироваться от организации к организации в рамках установленных общесетевых документов, при этом многие из них уже утратили актуальность с точки зрения современных технологических решений.

Основными задачами повышения коэффициента мощности являются: снижение потерь электроэнергии, более рациональное использование редкоземельных металлов, применяемых для создания электропроводящей аппаратуры, и оптимизация использования установленной мощности трансформаторов, генераторов и других машин переменного тока. Технические мероприятия, применяемые для повышения коэффициента мощности, могут быть разделены на две категории. Первая - при которых требуется установка специальных компенсирующих устройств, вторая - та, для которой требуются дополнительные компенсирующие устройства не требуются или естественная компенсация.

С физической точки зрения, необходимость компенсации реактивной мощности в сети связана с возникающими дополнительными потерями в устройствах преобразования электрической энергии, вызванных физическими свойствами реактивного тока. Такой ток отстает от напряжения в сети на 90 электрических градусов, поэтому, самым простым способом компенсации данного тока и как следствие повышения коэффициента мощности сети является введение емкостного тока, который опережает напряжение сети на 90 электрических градусов, или применение шунтирующих конденсаторных установок [3]. Компенсация реактивного тока в таких установках напрямую связана с их мощностью и при достаточных значения может быть достигнута полная компенсация, однако, такой объем компенсации реактивной мощности экономически нецелесообразен ввиду большого количества факторов, которые должны быть учтены для проекта компенсации. Так, при установке шунтирующей конденсаторной батареи с заведомо завышенной мощностью

для достижения полной компенсации без учета режимов работы нагрузки может быть достигнут обратный эффект - итоговый коэффициент мощности сети может быть снижен до недопустимых значений. Это связано с тем фактом что в режиме холостого хода при наличии подключенной конденсаторной батареи высокой мощности потребление активной мощности сети нагрузкой стремится к нулю. Поэтому при выборе компенсационной установки необходимо учитывать множество факторов работы сети или ее участка, для которого планируется выполнить работы по повышению коэффициента мощности, на этапе проектирования компенсационной установки. Так, должны быть учтены режимы работы потребителей, графики потребления активной и реактивной мощности, наличие устройств, генерирующих активную или реактивные мощности, устройств, изменяющих коэффициент мощности участка сети. При наличии этих данных и установленном желаемом уровне компенсации производится расчет компенсирующего устройства. В самом примитивном случае это может быть статическая сборка конденсаторов, оказывающая свое влияние на участок сети постоянно в одинаковом объеме, однако такие решения находят все меньшее применение. Все большее распространение получают регулируемые компенсирующие установки, в которых реактивная мощность конденсаторной батареи может регулироваться ступенчато в автоматическом режиме включая или отключая ступени при падении коэффициента мощности на подконтрольном участке сети. Эффективность такой компенсации так же будет связана и с тем где будет установлено данное устройство. Так, установка таких компенсаторов не может быть выполнена на выходе регулируемого привода - ее наличие может послужить выходом из строя электронных компонентов устройств преобразования частоты и напряжения. Однако удаленная установка компенсирующих устройств может не учитывать локальные пики реактивной мощности на участках сети.

Другим распространенным методом компенсации реактивной мощности выступают синхронные компенсаторы [4] - устройства на базе синхронных электродвигателей. В общем виде такие устройства представляют собой синхронный двигатель облегченной конструкции, предназначенный для работы на холостом ходу. Такой компенсатор может работать в двух режимах - перевозбуждения и недовозбуждения. В первом случае он будет выступать в роли генератора реактивной мощности, во втором же он будет являться ее потребителем. Исходя из конструктивных принципов такой машины, потребляемая реактивная мощность будет эквивалентна генерируемой. Автоматизация таких установок достигается введением управляющих цепей в систему управления током возбуждения синхронного двигателя-компенсатора. К основным недостаткам таких систем относят:

- относительно высокую потребляемую активную мощность, равную 2-4% от номинальной реактивной мощности, для конденсаторных батарей потребление активной мощности варьируется в диапазонах 0,3-0,4% от номинальной реактивной мощности установки;
- наличие движущихся частей и как следствие расходы на их обслуживание;
- шум.

Основным же преимуществом синхронных компенсаторов является плавность регулирования компенсируемой мощности системы, что недостижимо для конденсаторных установок.

Независимо от вида компенсирующего устройства перед его установкой необходимо проводить расчеты компенсационного устройства и выбор требуемого уровня компенсации. Это требование обязательно должно быть включено в перечень мероприятий по повышению коэффициента мощности сети или участка сети. Для этого существует несколько применяемых на практике методов. Базовый метод в таком случае применяется на этапе проектирования электрической сети и включает в себя анализ потребляемой мощности исходя из перечня оборудования с расчетом и выбором точек

установки основных и промежуточных компенсационных устройств с последующей технико-экономической оптимизацией. Другой метод - упрощенный, является ориентировочным расчетом и применим, как правило, для большинства практических случаев. Основа такого метода заключается в том, чтобы довести коэффициент мощности до уровня при котором будут отсутствовать штрафы за недостаточное значение коэффициента мощности. Для такого расчета часто используются табличные методы, пример такой компенсационной таблицы приведен на рис. 1.

Таблица. 1.

Таблица для упрощенного метода выбора компенсирующего устройства.

| До компенсации | | Номинальное значение (квар) блока конденсаторов, устанавливаемого на кВт нагрузки, для повышения cos φ (коэффициент мощности) или tan φ до заданного значения | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | tg φ | 0.75 | 0.59 | 0.48 | 0.46 | 0.43 | 0.40 | 0.36 | 0.33 | 0.29 | 0.25 | 0.20 | 0.14 | 0.0 |
| tg φ | cos φ | cos φ | 0.80 | 0.86 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 1 |
| 2.29 | 0.40 | | 1.557 | 1.691 | 1.805 | 1.832 | 1.861 | 1.895 | 1.924 | 1.959 | 1.998 | 2.037 | 2.085 | 2.146 | 2.288 |
| 2.22 | 0.41 | | 1.474 | 1.625 | 1.742 | 1.769 | 1.798 | 1.831 | 1.840 | 1.896 | 1.935 | 1.973 | 2.021 | 2.082 | 2.225 |
| 2.16 | 0.42 | | 1.413 | 1.561 | 1.681 | 1.709 | 1.738 | 1.771 | 1.800 | 1.836 | 1.874 | 1.913 | 1.961 | 2.022 | 2.164 |
| 2.10 | 0.43 | | 1.356 | 1.499 | 1.624 | 1.651 | 1.680 | 1.713 | 1.742 | 1.778 | 1.816 | 1.855 | 1.903 | 1.964 | 2.107 |
| 2.04 | 0.44 | | 1.290 | 1.441 | 1.558 | 1.585 | 1.614 | 1.647 | 1.677 | 1.712 | 1.751 | 1.790 | 1.837 | 1.899 | 2.041 |
| 1.98 | 0.45 | | 1.230 | 1.384 | 1.501 | 1.532 | 1.561 | 1.592 | 1.628 | 1.659 | 1.695 | 1.737 | 1.784 | 1.846 | 1.988 |
| 1.93 | 0.46 | | 1.179 | 1.330 | 1.446 | 1.473 | 1.502 | 1.533 | 1.567 | 1.600 | 1.636 | 1.677 | 1.725 | 1.786 | 1.929 |
| 1.88 | 0.47 | | 1.130 | 1.278 | 1.397 | 1.425 | 1.454 | 1.485 | 1.519 | 1.532 | 1.588 | 1.629 | 1.677 | 1.758 | 1.881 |
| 1.83 | 0.48 | | 1.076 | 1.228 | 1.343 | 1.370 | 1.400 | 1.430 | 1.464 | 1.497 | 1.534 | 1.575 | 1.623 | 1.684 | 1.826 |
| 1.78 | 0.49 | | 1.030 | 1.179 | 1.297 | 1.326 | 1.355 | 1.386 | 1.420 | 1.453 | 1.489 | 1.530 | 1.578 | 1.639 | 1.782 |
| 1.73 | 0.50 | | 0.982 | 1.232 | 1.248 | 1.276 | 1.303 | 1.337 | 1.369 | 1.403 | 1.441 | 1.481 | 1.529 | 1.590 | 1.732 |
| 1.69 | 0.51 | | 0.936 | 1.087 | 1.202 | 1.230 | 1.257 | 1.291 | 1.323 | 1.357 | 1.395 | 1.435 | 1.483 | 1.544 | 1.686 |
| 1.64 | 0.52 | | 0.894 | 1.043 | 1.160 | 1.188 | 1.215 | 1.249 | 1.281 | 1.315 | 1.353 | 1.393 | 1.441 | 1.502 | 1.644 |
| 1.60 | 0.53 | | 0.850 | 1.000 | 1.116 | 1.144 | 1.171 | 1.205 | 1.237 | 1.271 | 1.309 | 1.349 | 1.397 | 1.458 | 1.600 |
| 1.56 | 0.54 | | 0.809 | 0.959 | 1.075 | 1.103 | 1.130 | 1.164 | 1.196 | 1.230 | 1.268 | 1.308 | 1.356 | 1.417 | 1.559 |
| 1.52 | 0.55 | | 0.769 | 0.918 | 1.035 | 1.063 | 1.090 | 1.124 | 1.156 | 1.190 | 1.228 | 1.268 | 1.316 | 1.377 | 1.519 |
| 1.48 | 0.56 | | 0.730 | 0.879 | 0.996 | 1.024 | 1.051 | 1.085 | 1.117 | 1.151 | 1.189 | 1.229 | 1.277 | 1.338 | 1.480 |
| 1.44 | 0.57 | | 0.692 | 0.841 | 0.958 | 0.986 | 1.013 | 1.047 | 1.079 | 1.113 | 1.151 | 1.191 | 1.239 | 1.300 | 1.442 |
| 1.40 | 0.58 | | 0.665 | 0.805 | 0.921 | 0.949 | 0.976 | 1.010 | 1.042 | 1.076 | 1.114 | 1.154 | 1.202 | 1.263 | 1.405 |
| 1.37 | 0.59 | | 0.618 | 0.768 | 0.884 | 0.912 | 0.939 | 0.973 | 1.005 | 1.039 | 1.077 | 1.117 | 1.165 | 1.226 | 1.368 |
| 1.33 | 0.60 | | 0.584 | 0.733 | 0.849 | 0.878 | 0.905 | 0.939 | 0.971 | 1.005 | 1.043 | 1.083 | 1.131 | 1.192 | 1.334 |
| 1.30 | 0.61 | | 0.549 | 0.699 | 0.815 | 0.843 | 0.870 | 0.904 | 0.936 | 0.970 | 1.008 | 1.048 | 1.096 | 1.157 | 1.299 |
| 1.27 | 0.62 | | 0.515 | 0.665 | 0.781 | 0.809 | 0.836 | 0.870 | 0.902 | 0.936 | 0.974 | 1.014 | 1.062 | 1.123 | 1.265 |
| 1.23 | 0.63 | | 0.483 | 0.633 | 0.749 | 0.777 | 0.804 | 0.838 | 0.870 | 0.904 | 0.942 | 0.982 | 1.030 | 1.091 | 1.233 |
| 1.20 | 0.64 | | 0.450 | 0.601 | 0.716 | 0.744 | 0.771 | 0.805 | 0.837 | 0.871 | 0.909 | 0.949 | 0.997 | 1.058 | 1.200 |
| 1.17 | 0.65 | | 0.419 | 0.569 | 0.685 | 0.713 | 0.740 | 0.774 | 0.806 | 0.840 | 0.878 | 0.918 | 0.966 | 1.007 | 1.169 |
| 1.14 | 0.66 | | 0.388 | 0.538 | 0.654 | 0.682 | 0.709 | 0.743 | 0.775 | 0.809 | 0.847 | 0.887 | 0.935 | 0.996 | 1.138 |
| 1.11 | 0.67 | | 0.358 | 0.508 | 0.624 | 0.652 | 0.679 | 0.713 | 0.745 | 0.779 | 0.817 | 0.857 | 0.905 | 0.966 | 1.108 |
| 1.08 | 0.68 | | 0.329 | 0.478 | 0.595 | 0.623 | 0.650 | 0.684 | 0.716 | 0.750 | 0.788 | 0.828 | 0.876 | 0.937 | 1.079 |
| 1.05 | 0.69 | | 0.299 | 0.449 | 0.565 | 0.593 | 0.620 | 0.654 | 0.686 | 0.720 | 0.758 | 0.798 | 0.840 | 0.907 | 1.049 |
| 1.02 | 0.70 | | 0.270 | 0.420 | 0.536 | 0.564 | 0.591 | 0.625 | 0.657 | 0.691 | 0.729 | 0.769 | 0.811 | 0.878 | 1.020 |
| 0.99 | 0.71 | | 0.242 | 0.392 | 0.508 | 0.536 | 0.563 | 0.597 | 0.629 | 0.663 | 0.701 | 0.741 | 0.783 | 0.850 | 0.992 |
| 0.96 | 0.72 | | 0.213 | 0.364 | 0.479 | 0.507 | 0.534 | 0.568 | 0.600 | 0.634 | 0.672 | 0.712 | 0.754 | 0.821 | 0.963 |
| 0.94 | 0.73 | | 0.186 | 0.336 | 0.452 | 0.480 | 0.507 | 0.541 | 0.573 | 0.607 | 0.645 | 0.685 | 0.727 | 0.794 | 0.936 |
| 0.91 | 0.74 | | 0.159 | 0.309 | 0.425 | 0.453 | 0.480 | 0.514 | 0.546 | 0.580 | 0.618 | 0.658 | 0.700 | 0.767 | 0.909 |
| 0.88 | 0.75 | | 0.132 | 0.82 | 0.398 | 0.426 | 0.453 | 0.487 | 0.519 | 0.553 | 0.591 | 0.631 | 0.673 | 0.740 | 0.882 |
| 0.86 | 0.76 | | 0.105 | 0.255 | 0.371 | 0.399 | 0.426 | 0.460 | 0.492 | 0.526 | 0.564 | 0.604 | 0.652 | 0.713 | 0.855 |
| 0.83 | 0.77 | | 0.079 | 0.229 | 0.345 | 0.373 | 0.400 | 0.434 | 0.466 | 0.500 | 0.538 | 0.578 | 0.620 | 0.687 | 0.829 |
| 0.80 | 0.78 | | 0.053 | 0.202 | 0.319 | 0.347 | 0.374 | 0.408 | 0.440 | 0.474 | 0.512 | 0.552 | 0.594 | 0.661 | 0.803 |
| 0.78 | 0.79 | | 0.026 | 0.176 | 0.292 | 0.320 | 0.347 | 0.381 | 0.413 | 0.447 | 0.485 | 0.525 | 0.567 | 0.634 | 0.776 |
| 0.75 | 0.80 | | | 0.150 | 0.266 | 0.294 | 0.321 | 0.355 | 0.387 | 0.421 | 0.459 | 0.499 | 0.541 | 0.608 | 0.750 |
| 0.72 | 0.81 | | | 0.124 | 0.240 | 0.268 | 0.295 | 0.329 | 0.361 | 0.395 | 0.433 | 0.473 | 0.515 | 0.582 | 0.724 |
| 0.70 | 0.82 | | | 0.098 | 0.214 | 0.242 | 0.269 | 0.303 | 0.335 | 0.369 | 0.407 | 0.447 | 0.489 | 0.556 | 0.698 |
| 0.67 | 0.83 | | | 0.072 | 0.188 | 0.216 | 0.243 | 0.277 | 0.309 | 0.343 | 0.381 | 0.421 | 0.463 | 0.530 | 0.672 |
| 0.65 | 0.84 | | | 0.046 | 0.162 | 0.190 | 0.217 | 0.251 | 0.283 | 0.317 | 0.355 | 0.395 | 0.437 | 0.504 | 0.645 |
| 0.62 | 0.85 | | | 0.020 | 0.136 | 0.164 | 0.191 | 0.225 | 0.257 | 0.291 | 0.329 | 0.369 | 0.417 | 0.478 | 0.620 |
| 0.59 | 0.86 | | | | 0.109 | 0.140 | 0.167 | 0.198 | 0.230 | 0.264 | 0.301 | 0.343 | 0.390 | 0.450 | 0.593 |
| 0.57 | 0.87 | | | | 0.083 | 0.114 | 0.141 | 0.172 | 0.204 | 0.238 | 0.275 | 0.317 | 0.364 | 0.424 | 0.567 |
| 0.54 | 0.88 | | | | 0.054 | 0.085 | 0.112 | 0.143 | 0.175 | 0.209 | 0.246 | 0.288 | 0.335 | 0.395 | 0.538 |
| 0.51 | 0.89 | | | | 0.028 | 0.059 | 0.086 | 0.117 | 0.149 | 0.183 | 0.230 | 0.262 | 0.309 | 0.369 | 0.512 |
| 0.48 | 0.90 | | | | | 0.031 | 0.058 | 0.089 | 0.121 | 0.155 | 0.192 | 0.234 | 0.281 | 0.341 | 0.484 |

Значение, выбранное для примера в п.5.2

Значение, выбранное для примера в п.5.4

Исходя из этих методов должен быть осуществлен выбор компенсирующего устройства с последующим технико-экономическим обоснованием. Так, может получиться что для компенсации реактивной

мощности необходимо выполнить работы, стоимость которых будет нерентабельна сравнительно с уровнем штрафных санкций и экономии электроэнергии. В этом случае, либо следует провести пересмотр показателей, которые были или не были учтены в технико-экономическом расчете, пересмотреть выбор компенсационного устройства с целью оптимизации его конструкции и минимизации стоимости, рассмотреть возможность применения естественной компенсации, либо отказаться от мероприятий по повышению коэффициента мощности на некоторый период.

К методам естественной компенсации могут быть отнесены любые мероприятия, в ходе которых может быть снижено количество реактивных токов косвенным путем. Так, устранение нелинейности и неравномерности нагрузки в сети может способствовать уменьшению реактивной мощности и увеличению активной, что даст рост коэффициента мощности сети. Применение синхронных двигателей вместо асинхронных или двигателей постоянного тока может способствовать снижению реактивной мощности, так как в этом случае такие двигатели могут выступать в роли синхронных компенсаторов в процессе своей работы, однако такое применение двигателей не всегда допустимо конструктивно в уже созданных установках и технически во вновь разрабатываемых. Самым труд затратным, однако, возможно наиболее экономически эффективным методом естественной компенсации реактивной мощности сети предприятия может служить рационализация распределения нагрузок и упорядочение технологического процесса. Такая операция может способствовать улучшению режима энергопотребления оборудованием и как следствие повышению коэффициента мощности.

В заключение, стоит отметить, что реализация мероприятий по повышению коэффициента мощности электроустановок является важной и ответственной задачей потребителей всех уровней. Это связано с тем фактом что современная электротехническая база предъявляет все больше требований к качеству электрической энергии, а ее КПД может быть напрямую связан с

соотношением активной и реактивной составляющей токов в сети. Поэтому следует подходить к выполнению таких мероприятий организовано, проводя множество связанных расчетов и исследований для определения наиболее эффективного как технически, так и экономически способа компенсации реактивной мощности. При этом не всегда применения новейших средств и компонентов для компенсации реактивной мощности может помочь достигнуть желаемой цели, однако, к общим рекомендациям следует отнести их приоритезацию в выборе начальной точки для определения эффективности тех или иных компенсирующих устройств и мер.

**Использованные источники:**


1. Основы современной энергетики: учебник для вузов: в 2 т. / под общей редакцией чл.-корр. РАН Е. В. Аметистова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Том 2. Современная электроэнергетика / под ред. профессоров А.П. Бурмана и В.А. Строева. — 632 с., ил.
2. ГОСТ 721-77. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СЕТИ, ИСТОЧНИКИ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 8 с.
3. Константинов Б.А., О способах повышения коэффициента мощности, изд-во «Энергия», 1965.
4. Современные компоненты компенсации реактивной мощности (для низковольтных сетей). Справочное издание — Москва: Издательский дом «Додэка-XXI», 2003.- 64 с.