

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК ПРОДОЛЬНО-ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Ф. НОВОД

Рост потребления электроэнергии влечет за собой увеличение нагрузок, что в свою очередь приводит к ухудшению качества напряжения у потребителей. При этом в линиях средних напряжений обычно уже в стадии проектирования, а также при дальнейшей эксплуатации плотность тока оказывается значительно ниже нормы. Это вызывает необходимость применения устройств регулирования напряжения. С этой целью как за рубежом, так и в СССР для линий среднего напряжения нередко успешно использовались последовательно включенные конденсаторы, так называемые установки продольной компенсации (ПЕК).

Соответствующие расчеты показали [1-6], что их применение экономически выгоднее, чем другие способы повышения пропускной способности линий (замена проводов, повышение номинального напряжения, использование повышающих трансформаторов, параллельные конденсаторы и т. д.).

В СССР построено несколько опытных установок для напряжений до 35 кВ [7-11]. Из них в Эстонской ССР с начала 1960 г. внедрено шесть установок [12], в том числе пять для напряжения 10 кВ и одна для 35 кВ. По имеющимся литературным данным, предпринималось несколько попыток разрешить проблему проектирования установок ПЕК и дать оценку их работе [6, 13-15 и др.]. Но эти решения часто сложны, малообзорны или же касаются лишь конкретных условий. Поэтому целью настоящей работы является выработка универсальной номограммы, которая охватывала бы любые установки для любых нагрузок и напряжений.

Для этого:

- 1) выбраны целесообразные исходные параметры;
- 2) составлено уравнение работы установки;
- 3) проведен анализ данного уравнения и на его основе разработана универсальная номограмма.

### Исходные параметры

В соответствии с теоретическими предпосылками и опытом внедрения и эксплуатации опытных установок представляется целесообразным выбрать следующие исходные параметры:

- 1) входное напряжение установки ПЕК —  $U_b$ ;
- 2) повышение напряжения от установки по отношению к входному напряжению  $U_b - \Delta U_b\%$ ;

- 3) ток установки —  $I$ ;
- 4) коэффициент мощности на выходе установки —  $\cos \varphi_d$ ;
- 5) сопротивление установки —  $X_c$ .

### Уравнение продольной компенсации

На основе заранее выбранных параметров уравнение работы установки ПЕК выводится следующим путем.

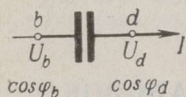


Рис. 1. Принципиальная схема установки продольной компенсации.

Повышение напряжения установки ПЕК (рис. 1) в процентах к входному напряжению описывается следующим выражением (рис. 2):

$$\Delta U_b^{\%} = \frac{\Delta U}{U_b} 100 = \frac{U_d - U_b}{U_b} 100 = \left( \frac{U_d}{U_b} - 1 \right) 100. \quad (1)$$

Затем нужно выразить входящую в уравнение (1) величину  $U_d$  через  $U_b$ ;  $I$ ;  $\varphi_d$  и  $X_c$ . Для этого целесообразно выразить  $U_d$  вначале через  $U_b$ ;  $\varphi_d$  и  $U_c$ , где

$$U_c = IX_c 10^{-3} [\text{кВ}]. \quad (2)$$

Из рис. 2 следует

$$\overline{OA}^2 + \overline{AB}^2 = U_b^2, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \overline{OA} &= U_d \cos \varphi_d \\ \overline{AB} &= \overline{DA} - \overline{DB} = \\ &= U_d \sin \varphi_d - U_c \sqrt{3}. \end{aligned}$$

Произведя в уравнении (3) соответствующие замены и переставив, получим квадратное уравнение

$$U_d^2 - (2\sqrt{3} U_c) U_d + (3U_c^2 - U_b^2) = 0,$$

решением которого является

$$U_d = \sqrt{3} \sin \varphi_d U_c \pm \sqrt{U_b^2 - 3U_c^2 \cos^2 \varphi_d}. \quad (4)$$

Имея в виду, что в данном случае надо принимать во внимание только положительное значение корня, заменим в уравнении (4) величину  $U_c$  уравнением (2), а полученную величину подставим в уравнение (1) и получим относительное повышение напряжения (в %)

$$\Delta U_b^{\%} = \sqrt{3} I \frac{X_c}{U_b} \sin \varphi_d 10^{-1} - 10^2 + 10^2 \sqrt{1 - 3 \left( I \frac{X_c}{U_b} \right)^2 \cos^2 \varphi_d} 10^{-6}, \quad (5)$$

где  $I$  — ток, а;  $X_c$  — сопротивление, ом;  $U_b$  — напряжение, кВ;  $\varphi_d$  — угол сдвига между током и напряжением на выходе установки, град.

В соответствии с уравнением (5) повышение напряжения с помощью установки ПЕК является функцией входного напряжения, сопротивления установки, тока и угла сдвига между током и напряжением потребителей

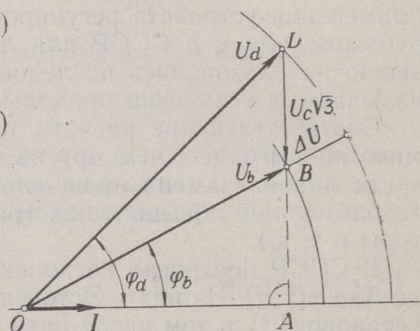


Рис. 2. Векторная диаграмма установки продольной компенсации.

$$\Delta U_b^{\%} = f\left(I \frac{X_c}{U_b}; \varphi_d\right). \quad (6)$$

При этом величина  $X_c$  связана в основном с установкой,  $U_b$  зависит от сети, а  $I$  и  $\varphi_d$  — от нагрузки.

### Анализ уравнения

В соответствии с формулой (6)  $\Delta U_b^{\%}$  представляет собой в координатах  $\Delta U_b^{\%} - \cos \varphi_d - I \frac{X_c}{U_b}$  геометрически выпуклую поверхность (рис. 3). По оси  $I \frac{X_c}{U_b}$  можно откладывать непосредственно размерность тока соответственно отношению  $\frac{X_c}{U_b}$ . Таким образом всем установкам в координатах  $\Delta U_b^{\%} - \cos \varphi_d - I$  соответствует одна и та же объемная характеристика; при этом масштаб на оси  $I$  зависит от отношения  $\frac{X_c}{U_b}$ .

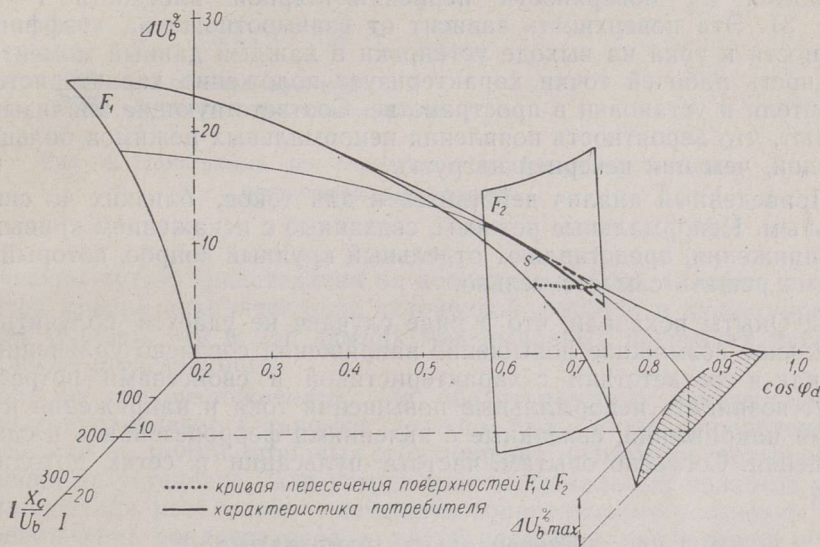


Рис. 3. Объемная характеристика установки продольной компенсации.

На основании полученных уравнений и объемной характеристики можно сделать следующие общие заключения для всех установок ПЕК:

1. Повышающее действие установки зависит от тока нагрузки, коэффициента мощности, емкостного сопротивления установки и входного напряжения.

2. Повышающее действие уменьшается с улучшением коэффициента мощности и может при этом стать отрицательным.

3. Повышающее действие увеличивается с ростом произведения  $I \frac{X_c}{U_b}$  до известных границ, достигая максимального значения. При дальнейшем росте  $I \frac{X_c}{U_b}$  повышающее действие установки ПЕК спадает.

Максимальное теоретическое повышение напряжения выражается уравнением

$$\Delta U_{b_{\max}}^{\%} = \frac{1 - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d} 10^2 \quad [\%] \quad (7)$$

и ограничивается, следовательно, только коэффициентом мощности  $\cos \varphi_d$ .

4. Установка ПЕК улучшает коэффициент мощности, причем перед установкой  $\cos \varphi_b$  описывается выражением

$$\cos \varphi_b = \frac{U_d}{U_b} \cos \varphi_d. \quad (8)$$

5. При питании потребителя через установку ПЕК рабочая точка находится на пересечении характеристики установки и характеристики потребителя. Характеристика установки определяется с достаточной точностью. Для различных установок и различных эксплуатационных условий характеристика остается одной и той же, изменяется лишь масштаб по оси  $I$  в зависимости от  $\frac{X_c}{U_b}$ . В то же время, как показали соответствующие измерения, характеристика потребителя изменчива в зависимости от состава и нагрузки потребителей и может быть определена лишь приближенно. Характеристика потребителя в каждый момент находится на поверхности перпендикулярной плоскости  $I - \cos \varphi_d$  (рис. 3). Эта поверхность зависит от соотношения коэффициента мощности и тока на выходе установки в каждый данный момент. Стабильность рабочей точки характеризует положение характеристик потребителя и установки в пространстве. Соответствующие анализы показывают, что вероятность появления ненормальных режимов больше при дневной, чем при вечерней нагрузке.

Приведенный анализ действителен для токов, близких к синусоидальным. Ненормальные режимы, связанные с искажением кривых тока и напряжения, представляют отдельный крупный вопрос, который необходимо решать самостоятельно.

6. Опыты показали, что в ряде случаев не удается получить максимальное возможное повышение напряжения согласно уравнению (7), так как в соответствии с характеристикой и свойствами потребителя могут возникать ненормальные повышения тока и напряжения и искажения напряжений, связанные с явлениями феррорезонанса и самовозбуждения. Согласно опытам, частота пульсации в сетях доходила до 10 гц.

### Универсальная номограмма

Уравнение установки ПЕК (5) приведено в виде номограммы на рис. 4. Последняя представляет собой проекции линий  $I \frac{X_c}{U_b} = \text{const}$  объемной характеристики на плоскость  $\Delta U_b^{\%} - \cos \varphi_d$  и вспомогательных кривых для перехода к различным величинам  $I$ ,  $X_c$  и  $U_b$ .

Приведенная на рис. 4 универсальная номограмма дает возможность проектировать установки ПЕК и оценивать режим их работы. На номограмме приведен пример расчета: при  $X_c = 45 \text{ ом}$ ;  $U_b = 10 \text{ кв}$ ;  $I = 20 \text{ а}$  и  $\cos \varphi_d = 0,8$  определено повышение напряжения  $\Delta U_b^{\%} = 9\%$ .

Поскольку в сельскохозяйственных сетях самое трудное положение с уровнями напряжений наблюдается в период зимних максимальных нагрузок, то обычно следует исходить из наибольшего повышения напряжения именно в это время. В соответствии с теоретической и экспериментальной работой, проведенной в Институте термofизики и электрофизики Академии наук Эстонской ССР, можно полагать, что граница отмеченных ненормальных явлений представляет на универсальной номограмме приближенно прямую линию. Такая граница, полученная

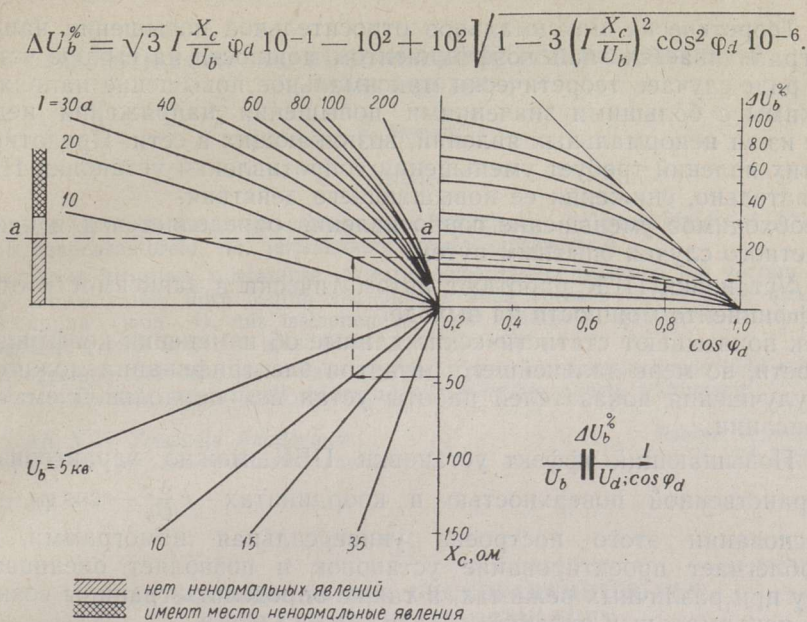


Рис. 4. Номограмма для определения параметров установок продольной компенсации.

эмпирическим путем, представлена на номограмме (рис. 4, линия  $a-a$ ). Ниже этой кривой находится зона устойчивой работы в любое время года, при условии, что и при зимних максимальных нагрузках работа ведется ниже этой границы.

Исходя из вышеизложенного, для предотвращения ненормальных режимов сопротивление установки должно быть ниже определенной величины, что, с другой стороны, ограничивает возможное повышение напряжения на установке. Для устранения ненормальных режимов при их возникновении необходимо уменьшить сопротивление установки путем переключения конденсаторов до такой величины, при которой обеспечена нормальная работа.

Согласно проведенным наблюдениям, вероятность возникновения ненормальных режимов больше при дневной, чем при вечерней нагрузке.

Универсальная номограмма использовалась при проектировании и налаживании работы установок продольной емкостной компенсации в Эстонской ССР. При этом теоретические выводы хорошо согласовались с практическими опытами.

## Выводы

1. Повышающее действие установок ПЕК зависит от тока нагрузки, коэффициента мощности, реактивного сопротивления установки и входного напряжения. Повышающее действие установки ПЕК уменьшается с увеличением коэффициента мощности и может при этом стать отрицательным. Повышающее действие улучшается с увеличением реактивного сопротивления и величины тока, достигая некоторого максимального значения. При дальнейшем увеличении сопротивления и тока повышающее действие снижается.

2. Теоретически максимальное относительное повышение напряжения ограничивается лишь коэффициентом мощности на выходе установки. В ряде случаев теоретически максимальное повышение напряжения и режимы с большими значениями повышения напряжения недостижимы из-за ненормальных явлений, возникающих в сети. Предотвращение этих явлений требует уменьшения сопротивления установки ПЕК и, следовательно, снижения ее повышающего действия.

Необходимое уменьшение сопротивления определяется для каждого конкретного случая опытным путем.

3. Установки ПЕК работают автоматически в зависимости от тока и коэффициента мощности на выходе.

Как показывают статистические данные об изменении коэффициента мощности, по мере дальнейшего развития электрификации можно ожидать улучшения показателей работы установок продольной емкостной компенсации.

4. Повышающий эффект установки ПЕК можно характеризовать пространственной поверхностью в координатах  $I \frac{x_c}{U_b} - \cos \varphi_d - \Delta U_b\%$ . На основании этого построена универсальная номограмма, которая облегчает проектирование установок и позволяет оценивать их работу при различных режимах, а также определять границы возникновения ненормальных явлений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dejou M. A., Bull. Soc. franç. électriciens, No. 8, 498—502 (1951).
2. Mäckel F. I., Waldmann E., Elektrizitätswirtschaft, Nr. 7, 177—183 (1954).
3. Schick W., Waldmann E., Elektrotechn. Z. B, Nr. 4, 105—108 (1955).
4. Деведжиев А. П., Сб. техн. инф. по строительству, монтажу и эксплуатации сельских электроустановок, № 5, 1960, стр. 620—622.
5. Казмиренко Ф. Л., Сб. техн. инф. по сельской электрификации, № 7, 1957, стр. 25—31.
6. Салищев Б. Е., Крупинин В. Л., Сб. техн. инф. по сельской электрификации, № 4, 1957, стр. 28—34.
7. Уссер А. С., Воронов Л. И., Бюл. науч.техн. инф. сев.-зап. н.-и. ин-та с. х., № 1—2, 1958, стр. 69.
8. Казмиренко Ф. Л., Сб. техн. инф. Гипросельэлектро, № 2, 1958, стр. 73—82.
9. Ибрагимов И. Э., Опыт эксплуатации продольной емкостной компенсации на нефтяных промыслах, Доклады на Всесоюзной конференции по качеству напряжения в электрических сетях и системах, ЭНИН, М., 1961.
10. Архипов Н. К., Расчет городских электрических сетей с учетом регулирующих устройств, Изд. Мин. коммунальн. хоз. РСФСР, М., 1957.
11. Уссер А. С., Сб. техн. инф., Гипросельэлектро, № 2, 1958, стр. 64—72.
12. Novod F., Põllumajanduse mehhaniseerimine ja elektrifitseerimine, ENSV NNRTTK Teadusl.-tehnil. Inform. Büllet, nr. 2, 1962, стр. 45—48.
13. Barozzi F., L'Electrotecnica, nr. 39, 495—505 (1952).
14. Smedsfelt S., Hjertberg P. H., Asea Journal, No. 27, 123—136 (1954).
15. Hochhäusler P., ETZ-A, Nr. 6, 169 (1959).
16. Koettnitz H., Guhl H., Mitteilungen des Instituts für Energetik, Nr. 24, 232—246 (1960).
17. Chappée M. F., Bull. S. F. E., No. 9, 521—529 (1951).
18. Кулефеев Г. П., Механиз. и электрифик. соц. с. х., № 2, 52 (1959).

## JÄRJESTIKKOMPENSATSIOONISEADME PÕHIPARAMEETRITE MÄÄRAMISEST

F. Novod

Resümee

Mitmetel juhtudel kasutatakse pingereguleerimiseks keskpingeliinidesse järjestikku lülitatud kondensaatoreid, nn. järjestikkompensatsiooniseadmeid.

Käesolevas kirjutises tuletatakse järjestikkompensatsiooniseadme töö võrrand. Parameetrite sobiva valiku tõttu osutub võimalikuks anda võrrand universaalse ülevaatliku nomogrammina (joon. 4), mis iseloomustab kõiki seadmeid igasuguste koormuste ja pingetega, ning teha üldistusi igasuguste seadmete kohta.

Nomogramm võimaldab kavandada seadmeid ja iseloomustada nende tööd erinevates režiimides ning anda empiirilisel määratud piir häirivate nähete tekkimisele.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituut

Saabus toimetusse  
25. VI 1964

## DIE BESTIMMUNG DER GRUNDPARAMETER DER REIHENKOMPENSATIONSANLAGEN

F. Novod

Zusammenfassung

In der Sowjetunion sowie im Auslande sind zur Spannungsregelung in Mittelspannungsnetzen mehrfach Reihenkondensatoren verwendet.

Es werden im Artikel zweckmässige Parameter gewählt und eine Gleichung des Wirkens der Reihenkompensationsanlage entwickelt. Zweckmässige Wahl der Parameter ermöglicht die Gleichung als universelles, übersichtliches Nomogramm (Fig. 4) darzustellen, das alle Reihenkompensationsanlagen mit beliebigen Betriebsspannungen und Belastungen zusammenfasst, um allgemeine Folgerungen zu ziehen.

Das Nomogramm ermöglicht Planung und Schätzung des Wirkens der Anlagen in verschiedenen Betriebsbedingungen sowie die empirisch festgestellte Grenze für die Entstehung von unnormalen Betriebsverhältnissen (periodische Spannungsschwankungen; Ströme und Spannungen unnormaler Grösse) zu geben.

Institut für Thermophysik und Elektrophysik  
der Akademie der Wissenschaften der Estnischen S.S.R

Eingegangen  
am 25. Juni 1964