

2. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46-53.

3. Shukla T. N. Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks / T. N. Shukla, S. P. Singh, K. B. Naik // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2010. – Vol. 2. – № 3. – P. 94-106.

4. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1972. – 232 с.

5. Лежнюк П. Д. Функціональна залежність складових втрат потужності у вітках електричної мережі від потужності у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 4. – С. 58-62.

6. Acharya N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network / N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulanathan // Electric Power and Energy Systems. – 2006. – Vol. 28. – P. 669-678.

УДК 621.316.11

Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук

П.Ю. Красовский, ассистент

ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ф.П. Шкрабець, д-р техн. наук

П.Ю. Красовський, асистент

ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП НА ТЕХНІЧНІ ВТРАТИ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

F.P. Shkrabets, Doctor of Technical Sciences

P.Y. Krasovskiy, assistant

National Mining Universitet, Dnepropetrovsk, Ukraine

ANALYSIS OF OVERHEAD LINES PARAMETERS INFLUENCE ON TECHNICAL POWER LOSSES IN TRANSIT

Проведен анализ структуры технологических потерь электроэнергии с точки зрения оценки влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на значения и возможную при этом динамику технических потерь при транспортировке электроэнергии; рассмотрены характер и степень изменения параметров воздушных линий в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: воздушные линии электропередач, динамика технических потерь, коррозия алюминия.

Проведено аналіз структури технологічних втрат електроенергії з погляду оцінювання впливу тривалості й умов експлуатації повітряних ліній електропередачі на значення й можливу при цьому динаміку технічних втрат під час транспортування електроенергії; розглянуто характер і ступінь зміни параметрів повітряних ліній у процесі експлуатації.

Ключові слова: повітряні лінії електропередач, динаміка технічних втрат, корозія алюмінію.

The analysis of power losses structure in terms of assessing the impact of the duration and conditions of overhead power lines use on the values and possible technical losses dynamic in the electricity transmission is carried out; the formation and degree of overhead line parameters change during operation is examined.

Key words: overhead power lines, the dynamics of technical losses, the corrosion of aluminum.

Постановка проблеми. На фоне происходящих в Украине изменений хозяйственного механизма в энергетике, изменения экономических отношений, проблема снижения потерь электроэнергии в электрических сетях не только не утратила свою актуальность, а, наоборот, выдвинулась в одну из задач обеспечения финансовой стабильности энергоснабжающих организаций.

Опыт энергосистем показывает, что при долгосрочной эксплуатации воздушных линий электропередач потери мощности и электроэнергии в них даже при неизменной

нагрузке возрастают. Одна из причин – изменение конфигурации отдельных участков ЛЭП и в связи с этим изменения значений эквивалентных сопротивлений. Из основных возможных причин изменения продольных сопротивлений ЛЭП можно отметить:

- уменьшение поперечного сечения и увеличение длины проводов, обусловленного их остаточной деформацией вследствие действия ветровых, гололедных и других нагрузок;
- коррозия проводов ЛЭП при влиянии на них разных климатических факторов (в том числе кислотных дождей, влажности, повышенной температуры, солнечной радиации) также приводит к снижению их активного поперечного сечения;
- увеличение удельного сопротивления материала проводов ЛЭП, вызванного изменением их структуры (старением) и остаточной деформацией („наклепом”).

В свою очередь, технические потери электроэнергии при ее транспортировке в распределительных сетях являются основой норматива, определяющего экономически обоснованный технологический расход электроэнергии [1], поэтому точная оценка потерь электроэнергии обеспечивает корректное определение эффективности работы сетевого предприятия и планирование энергосберегающих мероприятий.

Цель статьи показать и проанализировать структуру технологических потерь электроэнергии с точки зрения оценки влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на значения и динамику технических электрических потерь при транспортировке электроэнергии.

Изложение основного материала. В системах электроснабжения при транспортировке электроэнергии технологические потери электроэнергии представляют собой сумму двух составляющих потерь:

- потерь в линиях и оборудовании электрических сетей, обусловленных физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии в соответствии с техническими характеристиками и режимами работы линий и оборудования (технические потери);
- расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций.

В свою очередь, технические потери – сумма трех составляющих потерь в линиях и оборудовании электрических сетей:

- потерь, зависящих от нагрузки электрической сети (нагрузочные потери);
- потерь, зависящих от состава включенного оборудования (условно-постоянные потери);
- потерь, зависящих от погодных условий (потери на корону).

В общем случае, для воздушных линий электропередачи при передаче электроэнергии от источников к потребителям можно рассматривать нагрузочные потери, потери холостого хода и потери на корону. Нагрузочные потери активной электроэнергии в трехфазной воздушной линии определяются выражением

$$\Delta W_n = 3R \int_0^T I^2(t) dt, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление провода одной фазы воздушной линии; $I(t)$ – полный ток в линии в течение интервала времени T .

Активные потери холостого хода для воздушных ЛЭП (условно-постоянные потери) определяют по формуле

$$\Delta W_{xx} = \frac{\Delta P_{xx}}{U_{ном}^2} \int_0^T U^2(t) dt, \quad (2)$$

где ΔP_{xx} – потери мощности холостого хода линии при номинальном напряжении, которые определяются токами утечки через изоляцию (междуфазную и относительно земли);

$U_{ном}$ – номинальное напряжение в сети, при котором работает линия; $U(t)$ – напряжение в линии в течение интервала времени T .

Определение потерь на корону в воздушных ЛЭП с точки зрения точности является проблематичным, так как они зависят от ряда специфических факторов (метеорологических условий на трассе линии, электрического поля, геометрических параметров, расположения фазных проводов линий электропередач и т. д). Выполнялись исследования с целью уточнения методики расчета потерь мощности и энергии на корону на проводах в равнинных условиях. В [2] представлено обоснование и вывод уравнения потерь активной мощности на корону на основании интегральных характеристик короны и результатов зондовых исследований движения объемного заряда в поле короны переменного тока. Согласно [2], в области общей короны зависимость потерь мощности на один провод от напряжения и параметров ЛЭП выражается формулой

$$\Delta P_{кор} = \omega C^2 \frac{U_m (U_m - U_0)}{2} \cdot \frac{K_1 \cos \varphi_{K1}}{C_{об} - C}, \quad (3)$$

где U_0 – напряжение, соответствующее критическому заряду на поверхности провода; U_m – амплитуда фазного напряжения; C – емкость одной фазы воздушной линии; $C_{об} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(r_n/r_n)}$ – емкость объемного заряда; r_n – радиус наружной области, в которой суммарная плотность объемного заряда имеет ненулевое значение; r_n – радиус фазного провода; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха; φ_{K1} – угол сдвига фаз первой гармоники тока относительно напряжения; $K_1 = Q_1/Q_{к.макс}$ – отношение амплитуды первой гармоники к амплитуде компенсированного заряда; ω – угловая частота переменного напряжения.

Произведение $K_1 \cos \varphi_{K1}$, вычисленное для реальных условий по экспериментальным данным при величине относительного перенапряжения равного 2, имеет значение примерно 0,7. Тогда формула для потерь мощности на корону примет вид

$$\Delta P_{кор} = 0,35 \omega C^2 U_m (U_m - U_0) / (C_{об} - C). \quad (4)$$

С точки зрения оценки влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на значения и возможную при этом динамику технических электрических потерь при транспортировке электроэнергии, выделим основные технические и физические характеристики воздушных линий, влияющих на нагрузочные потери, потери холостого хода и потери на корону в этих же линиях, и рассмотрим характер и степень изменения параметров воздушных линий в процессе эксплуатации.

Для определения нагрузочных потерь электрической энергии в линиях, учитывая практическую невозможность математически выразить закон изменения тока нагрузки в линии за длительный промежуток времени, можно воспользоваться формулой, учитывающей составляющие передаваемой мощности [1; 2]:

$$\Delta W_n = \Delta P_a \cdot \tau_a + \Delta P_p \cdot \tau_p \quad (5)$$

или

$$\Delta W_n = 3 \cdot K_\phi^2 \cdot (I_m \cos \varphi)^2 \cdot R \cdot \tau_a + 3 K_\phi^2 \cdot (I_m \sin \varphi)^2 \cdot R \cdot \tau_p, \quad (6)$$

где ΔP_a – потери активной мощности от передачи активной мощности; ΔP_p – потери активной мощности от передачи реактивной мощности; $\tau_a = (0,124 + T_{ма} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760$ – количество часов максимальной нагрузки по активной мощности;

$\tau_p = (0,124 + T_{mp} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760$ – количество часов максимальной нагрузки по реактивной мощности; K_ϕ – коэффициент формы графика нагрузки; I_m – максимальный расчетный ток; T_{ma} – количество часов использования максимальной нагрузки по активной мощности; T_{mp} – количество часов использования максимальной нагрузки по реактивной мощности.

Анализ выражений (1) и (5) показывает, что величиной, относящейся к техническим параметрам воздушной линии и влияющей на значение нагрузочных потерь, является активное сопротивление (продольное) провода одной фазы воздушной линии R . В свою очередь, указанное сопротивление зависит от удельного сопротивления материала проводника ρ , длины линии l и сечения F (диаметра d) провода и определяется по известному выражению

$$R = \rho \frac{l}{F} = \rho \frac{l}{\pi d^2 / 4}. \quad (7)$$

Исходя из последнего выражения, можно констатировать, что для воздушных линий электропередачи в процессе их длительной эксплуатации возможно увеличение активного сопротивления ЛЭП и, соответственно, увеличение нагрузочных потерь за счет уменьшения площади эффективного сечения (и диаметра) фазных проводов воздушных линий за счет коррозионных процессов.

Следует отметить, что активное сопротивление также зависит от температуры:

$$R = R_T [1 + \alpha(\theta_{II} - 20^\circ)], \quad (8)$$

где R_T – табличное значение сопротивления провода (при температуре 20°C); α – температурный коэффициент, который для проводов типа A равен $0,004$; θ_{II} – реальная температура провода, $^\circ\text{C}$.

Температура провода определяется тремя факторами: величиной тока, температурой окружающей среды и скоростью ветра. Главным фактором, определяющим температуру провода, является температура окружающей среды. Учет температурного фактора увеличивает точность расчетов приблизительно на 5-10 %. Если нагрузка линии не превышает 70-80 % допустимой по нагреву, то температуру провода при расчетах потерь принимают равной среднегодовой температуре воздуха и, учитывая сезонные колебания температуры в Украине, нагрузочные потери в целом по году практически не зависят от температурных изменений сопротивления проводов воздушных линий электропередачи.

На индуктивное сопротивление воздушной линии оказывают влияние также диаметр провода, магнитная проницаемость провода и частота переменного тока. Значение индуктивного сопротивления одной фазы воздушной линии (из алюминиевого провода) на 1 км (Ом/км) определяется следующей формулой:

$$x_0 = 0,1441g \frac{2D_{cp}}{d} + 0,016, \quad (9)$$

где D_{cp} – среднее геометрическое расстояние между осями проводов: $D_{cp} = \sqrt[3]{D_{1-2}D_{2-3}D_{1-3}}$; D_{1-2} , D_{1-3} и D_{2-3} – действительные расстояния между проводами фаз 1, 2, 3; d – фактический внешний диаметр провода.

Из формулы (9) видно, что индуктивное сопротивление зависит только от расстояния между проводами и от их диаметра, причем влияние этих величин незначительно, поскольку они входят в выражение под знаком логарифма. Коррозионные изменения диаметра фазного провода по сравнению с изменениями площади поперечного сечения будут значительно меньшими (фазный проводник многопроволочный), следовательно, влияние указанных изменений на значения индуктивного сопротивления неощутимо.

Кроме того, индуктивное сопротивление не участвует в формировании потерь активной энергии и влияет на величину потерь реактивной энергии и потерю напряжения в ЛЭП.

Потери холостого хода в воздушных линиях, т. е. потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам воздушных линий в соответствии с методикой расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях определяют на основе данных об удельных потерях мощности, приведенных в табл., и о продолжительностях видов погоды в течение расчетного периода.

Таблица

Удельные потери мощности от токов утечки по изоляторам ВЛ

Группа погоды	Потери мощности от токов утечки по изоляторам, кВт/км, на ВЛ напряжением, кВ											
	6	10	15	20	35	60	110	154	220	330	500	750
1	0,011	0,017	0,025	0,033	0,035	0,044	0,055	0,063	0,069	0,103	0,156	0,235
2	0,094	0,153	0,227	0,302	0,324	0,408	0,510	0,587	0,637	0,953	1,440	2,160
3	0,154	0,255	0,376	0,507	0,543	0,680	0,850	0,978	1,061	1,587	2,400	3,600

По влиянию на токи утечки виды погоды должны объединяться в 3 группы: 1 группа – хорошая погода с влажностью менее 90 %, сухой снег, изморозь, гололед; 2 группа – дождь, мокрый снег, роса, хорошая погода с влажностью 90 % и более; 3 группа – туман.

Потери на корону в высоковольтных линиях напряжением 110...750 кВ обусловлены токами утечки, образующимися при ионизации воздушного пространства вокруг провода. Потери на корону зависят в основном от величины напряжения на линии, сечения проводов, конструкции фазы провода и метеорологических условий на трассе линии.

Анализ большого числа работ, выполненных у нас в стране и за рубежом, посвященных оценке, измерению, расчету и анализу потерь на корону позволяет сделать заключение о том, что приводимые в литературных источниках формулы для расчета потерь на корону дают их приближенную оценку [2], прямые измерения этих потерь на действующих линиях требуют применения специализированного оборудования и измерительных устройств, сопряжены с большими затратами материальных средств и организационных усилий.

На практике потери электроэнергии на корону определяют на основе данных об удельных потерях мощности и о продолжительностях видов погоды в течение расчетного периода. При этом к периодам хорошей погоды (для целей расчета потерь на корону) относят погоду с влажностью менее 100 % и гололед; к периодам влажной погоды – дождь, мокрый снег, туман. Выполненный анализ показывает, что отмеченные удельные потери мощности на корону практически не зависят от физических параметров фазных токоведущих проводников, так как, во-первых, радиус фазного провода участвует в формуле для определения потерь под знаком логарифма и его динамика (например, от коррозии) практически не ощутима; во-вторых, в сетях напряжением 110 кВ и более применяют расщепление фазных проводов и в расчетах участвует эквивалентный радиус, что практически исключает возможность учета коррозионных изменений физических параметров проводников воздушных линий.

Выводы

1. На значения потерь холостого хода и потерь на корону в воздушных линиях эксплуатационные (в течение срока эксплуатации) изменения параметров самих линий (конструкция и характеристики проводов) сколько-нибудь заметного влияния не оказывают.

2. Основные изменения с течением времени возможны в уровнях нагрузочных потерь за счет динамики активных сопротивлений проводов воздушных линий от действия коррозионных процессов.

3. Длительная эксплуатация воздушных ЛЭП сопряжена с уменьшением диаметра проводов линий и, соответственно, увеличением удельного сопротивления проводов, что, в свою очередь, является причиной увеличения тепловых потерь в стационарных воздушных сетях с нарастанием срока эксплуатации.

Список использованных источников

1. *Воротницкий В. Э.* Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях : учебно-методическое пособие / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина. – 3-е изд. – М. : ИПК госслужбы, 2003. – 64 с.
2. *К вопросу* уточнения расчета потерь мощности на корону в высокогорных воздушных линиях электропередачи / Л. В. Егизарян, В. С. Сафарян, Л. О. Караханян и др. // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2010. – Т. 63, № 1. – С. 63-69.

УДК 621.311

О.С. Яндульський, д-р техн. наук

В.В. Мацейко, аспірант

НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМ ЗАСОБАМИ СИСТЕМ ГНУЧКИХ ПЕРЕДАЧ ЗМІННОГО СТРУМУ

А.С. Яндульський, д-р техн. наук

В.В. Мацейко, аспірант

НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ СРЕДСТВАМИ СИСТЕМ ГИБКИХ ПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

O.S. Yandulskyi, Doctor of Technical Sciences

V.V. Matseiko, post-graduate student

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

IMPROVING THE QUALITY OF POWER SYSTEMS BY MEANS OF FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS

Проаналізовано світовий досвід впровадження систем гнучких передач змінного струму для підвищення ефективності управління енергосистемами. Узагальнені функціональні можливості та лідери на світовому ринку цих пристроїв. Розглянута необхідність інтеграції систем ГПЗС в ОЕС України з метою вирішення проблем та недоліків, які притаманні їй на цьому етапі розвитку. Розроблена автоматична система керування тиристорною установкою поздовжньої компенсації, проведено моделювання та аналіз впливу ТУПК на підвищення пропускної здатності ліній електропередач та здійснення ефективного демпфювання низькочастотних коливань.

Ключові слова: гнучкі системи передачі змінного струму, статичний тиристорний компенсатор, тиристорна установка поздовжньої компенсації, система керування, моделювання.

Проанализирован мировой опыт внедрения систем гибких передач переменного тока для повышения эффективности управления энергосистемами. Обобщены функциональные возможности и лидеры на мировом рынке данных устройств. Рассмотрена необходимость интеграции систем ГПЗС в ОЭС Украины с целью решения проблем и недостатков, которые присущие на данном этапе развития. Разработана автоматическая система управления тиристорной установкой продольной компенсации, проведено моделирование и анализ влияния ТУПК на повышение пропускной способности линий электропередач и осуществления эффективного демпфирования низкочастотных колебаний.

Ключевые слова: гибкие системы передачи переменного тока, статический тиристорный компенсатор, тиристорная установка продольной компенсации, система управления, моделирование.

Flexible AC transmission systems (FACTS) controllers have been mainly used for solving various power system steady state control problems. The world's literature shows an increasing interest in this subject for the last two decades, where the enhancement of system stability using FACTS controllers has been extensively investigated. Some of the utility experience, real-world installations, and semiconductor technology development have been reviewed and summarized. The control scheme of a typical Thyristor Controlled Series Capacitor controller is described. The results of applying the proposed TCSC controller design for optimal power flow and increase the system damping for low frequency oscillation sareanalyzed.

Key words: kexible aternative current transmission systems, static var compensator, thyristor controlled series capacitor, control system, modeling.

Постановка проблеми. Сучасний стан енергетики України характеризується поступовим впровадженням організаційно-технічних заходів, спрямованих на модерніза-