



УДК 621.311.1

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-21

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В МАГІСТРАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 330-750 кВ

Коваленко О. І., к. т. н.,

Коваленко Л. Р., к. т. н.

Запорізький національний університет

e-mail: oleksandr071967@gmail.com

Анотація – розглянуто шляхи підвищення ефективності передачі електричної енергії в мережах напругою 330-750 кВ. Ефективність передачі електричної енергії знижується за рахунок наявних технологічних втрат в елементах електричної мережі. Основними технологічними втратами є навантажувальні втрати в елементах мережі та втрати на корону в проводах повітряних ліній. Запропоновано контролювати в реальному часі навантажувальні втрати та втрати потужності на корону в магістральних повітряних лініях електропередачі. Втрати потужності на корону суттєво залежать від погодних умов і рівня напруги в мережі. Незначне зниження напруги в мережі під час дощу та при відкладенні на проводах паморозі дозволить суттєво скоротити втрати електричної енергії в проводах високовольтних повітряних ліній.

Ключові слова: ефективність передачі електроенергії, технологічні втрати електроенергії, навантажувальні втрати, втрати потужності на корону, рівень напруги, погодні умови.

Постановка проблеми. Проблема втрат електроенергії при її передачі є досить гострою для електроенергетики. Щоб передача електричної енергії була економічно вигідною та ефективною, необхідно мінімізувати втрати в елементах електричних мереж. Це досягається тим, що передача електроенергії на великі відстані здійснюється на високій напрузі. В магістральних мережах України напругою 330 та 750 кВ щорічно фактичні втрати електричної енергії становлять до 2% від загальної її кількості, що надходить з електростанцій, що істотно впливає на тарифи на електроенергію. Одним із дієвих шляхів зниження вартості передачі електроенергії є, на ряду із зменшенням її втрат, ефективне прогнозування їх обсягів.

Аналіз останніх досліджень. В магістральних мережах з напругою 330 кВ і вище суттєвим видом втрат є втрати електричної активної потужності (енергії) на нагрів проводів і на корону в повітряних лініях [1-3].

Протягом тривалого часу в Україні і за кордоном, проводяться дослідження, спрямовані на розробку ефективних методів виміру,



розрахунку і оцінки втрат активної потужності на корону у високовольтних повітряних лініях електропередач змінного струму [4].

У результаті проведених досліджень, узагальнення експериментального матеріалу була створена теорія корони змінного струму, отримані характеристики корони, запропоновані формули для розрахунків втрат потужності на корону, розроблені методи і прилади їхнього виміру [5, 6].

Однак, існуючі методики для визначення втрат активної потужності на корону побудовані на ряді припущень і спрощень, пов'язаних з детермінованим представленням чинників, що впливають на корону (конструктивних, метеорологічних, режимних), а також незмінності пасивних параметрів лінії, що вносить похибки в результати розрахунків при плануванні режимів електроенергетичних систем і їхньому оперативному керуванні.

У той же час відомо, що для ефективного оперативного керування електроенергетичною системою (ЕЕС) необхідно враховувати реальні втрати активної потужності на корону, а при оперативній оптимізації режимів роботи мережі та рівня втрат використовувати реальні залежності втрат активної потужності на корону від напруги мережі.

Одержання реальних величин втрат активної потужності на корону шляхом їхніх прямих вимірів на високовольтних полігонах і діючих високовольтних лініях вимагає застосування спеціалізованого устаткування і вимірювальних пристроїв, що пов'язане з великими витратами матеріальних ресурсів і організаційних зусиль. Але і ці, окремо виконані виміри втрат на корону, виконуються за умов фіксованих значень чинників, що впливають, і свідчать лише про порядок величини втрат і можуть бути використані тільки як наближені оцінки [7].

Формулювання цілей статті. Метою роботи є пошук шляхів вирішення задачі оперативного визначення і мінімізації втрат активної потужності на корону для підвищення ефективності передачі електричної енергії в мережах напругою 330-750 кВ. Використання сучасних засобів одержання і обробки оперативної інформації про параметри режиму високовольтної повітряної лінії (ВПЛ) створює реальні передумови для вирішення цієї задачі.

У загальному випадку, підвищити точність оперативного визначення втрат активної потужності в ВПЛ доцільніше за рахунок одночасної ідентифікації їх пасивних параметрів, а також урахуванням в явному вигляді активних втрат на корону і додаткового ємнісного струму, обумовленого короною.

Необхідно підвищити точності визначення пасивних параметрів лінії і їх оперативного корегування при зміні факторів, що впливають

на них, для вирішення завдання оперативного визначення втрат на корону.

Основні матеріали дослідження. Стосовно діючих ВПЛ об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України актуальність вирішення задач оперативних розрахунків і мінімізації втрат активної потужності на корону визначається такими основними чинниками:

а) великою протяжністю ВПЛ із робочою напругою 330-750 кВ, у яких втрати активної потужності на корону у деяких випадках порівнянні і навіть при певних умовах перевищують навантажувальні втрати;

б) різноманітністю метеорологічних умов різних регіонів України, через які проходять траси ВПЛ та різноманітністю метеорологічних умов у різні періоди року, що впливають на рівень втрат на корону.

Структура втрат електроенергії в елементах магістральних мереж ВП «Дніпровська електроенергетична система» представлена в таблиці 1 [2, 3].

Таблиця 1

Структура втрат в елементах магістральних мереж ВП «Дніпровська електроенергетична система» за 2017 рік

Напруга, кВ	Змінні втрати в ЛЕП, ГВт·год.	Втрати на корону ЛЕП, ГВт·год	Втрати від струмів витоку ЛЕП, ГВт·год.	Змінні втрати в трансформаторах, ГВт·год	Постійні втрати в трансформаторах, ГВт·год	Всього інших умовно-постійних втрат, ГВт·год	Втрати в шунтуючих реакторах, ГВт·год	Інші втрати, тис. кВт·год	Всього, ГВт·год
750	163,3	89,1	6,2	18,4	19,0	30,6	29,1	1,6	326,6
330	367,2	86,5	7,8	28,7	59,0	3,7		3,7	552,9
Разом	530,5	175,6	14,0	47,1	78,0	34,3	29,1	5,3	879,5

Як видно із таблиці 1 в магістральних мережах ВП «Дніпровська електроенергетична система» напругою 330 та 750 кВ втрачається близько 880 ГВт·год електричної енергії на рік. Значна частина цих втрат припадає на змінні (навантажувальні) втрати у ВПЛ – 530,5 ГВт·год (60%) та на втрати на корону ЛЕП – 175,6 ГВт·год (20%) [3]. Можна зробити висновок, що передача електричної енергії магістральними мережами супроводжується втратами. Підвищити ефективність



передачі електроенергії можна шляхом визначення розміру технічних втрат у ВПЛ та розробкою заходів для зменшення їх обсягів.

Якщо в гарну погоду навантажувальні втрати у ВПЛ переважають над втратами на корону, то при поганій погоді (сніг, дощ, ожеледь, паморозь) втрати на корону суттєво збільшуються [4].

Створення системи безперервного виміру втрат на корону ВПЛ є необхідною базою для оптимізації режиму за напругою і потокам реактивної потужності.

Навантажувальні втрати електроенергії включають в себе втрати в повітряних і кабельних лініях, трансформаторах, шинопроводах і струмообмежувальних реакторах.

Для розрахунку навантажувальних втрат використовується метод оперативних розрахунків, суть якого полягає в розрахунку втрат електроенергії за формулою [4-6]

$$\Delta W_n = 3 \sum_{i=1}^n R_i \cdot \sum_{j=1}^m I_{ij} \Delta t_{ij}, \quad (1)$$

де n – кількість елементів мережі;
 R_i – опір i -го елемента мережі;
 I_{ij} – струм навантаження i -го елемента мережі;
 Δt_{ij} – період часу протягом якого I_{ij} незмінний;
 m – кількість інтервалів часу.

Струмові навантаження елементів мережі визначають на основі диспетчерських даних, оперативних вимірювальних комплексів (ОВК) та автоматизованих систем контролю і обліку електроенергії.

Припустимо, що при зміні напруги в лінії потужність навантаження залишається постійною. Дане припущення справедливо в умовах, коли при зміні напруги в лінії напруга у вузлі навантаження залишається незмінною за рахунок роботи автоматики регулювання напруги в розподільній мережі, тоді струм в лінії буде дорівнює [4]

$$I_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{3}U_{ij}}, \quad (2)$$

де S_{ij} – потужність i -го елемента мережі.

Тоді сумарні втрати в лініях

$$\Delta W_n = 3 \sum_{i=1}^n R_i \cdot \sum_{j=1}^m \frac{S_{ij}^2}{U_{ij}^2} \cdot \Delta t_{ij}. \quad (3)$$

Відповідно, втрати електричної енергії в мережі обернено пропорційні квадрату напруги мережі.

Втрати електроенергії на корону визначаються на основі даних про питомі втрати потужності, і про тривалість видів погоди протягом розрахункового періоду. При цьому до періодів гарної погоди (для цілей розрахунку втрат на корону) відносять погоду з вологістю менше 100% і ожеледь, до періодів вологої погоди – дощ, мокрий сніг, туман. При відсутності даних про тривалість видів погоди протягом розрахункового періоду втрати електроенергії на корону визначаються в залежності від регіону розташування повітряної лінії [4].

Втрати потужності на корону змінюються в дуже широкому діапазоні, який відповідає двом порядкам, при цьому зміна втрат в часі протікає часом дуже швидко. Таким чином, періодичні вимірювання на контрольованих прольотах не дозволяють отримати достовірні значення середніх і максимальних втрат на корону.

Для визначення характеристик втрат на корону необхідно мати дані безперервних змін погодних параметрів і втрат на корону протягом періоду сонячної активності за декілька років, так як цим періодом сонячної активності визначається циклічна повторюваність метеорологічних явищ. В межах цього періоду втрати на корону можна вважати стаціонарним випадковим процесом, характеристиками якого є його функція розподілу і кореляційна функція [4, 5].

Аналіз показав, що розглянута методика заснована на результатах вимірювань втрат на корону на контрольованих прольотах тривалістю кілька сотень годин, що явно недостатньо [4, 5].

Втрати активної потужності на корону пропорційні напрузі у п'ятому ступені

$$\Delta P_k = P_{кн} \left(\frac{U}{U_n} \right)^5, \quad (4)$$

де $P_{кн}$ – номінальні втрати активної потужності при номінальній напрузі мережі U_n .

Із формул (3) та (4) випливає, що втрати на корону більш чутливі до зміни напруги, ніж навантажувальні втрати.



Так в період найбільших втрат сумарні втрати можна знизити, шляхом зменшення напруги, хоча при цьому зростуть втрати від струмів навантаження.

На даний час розроблена автоматизована система безперервних вимірювань втрат потужності на корону і метеопараметрів, за допомогою якої проводяться вимірювання в діючих ПЛ 330 кВ і 750 кВ.

На основі цих даних і теоретичних досліджень властивостей коронного розряду на проводах розроблена методика для розрахунку втрат на корону ПЛ різних номінальних напруг і конструкцій [5, 6].

Для оцінки значень втрат, розрахованих і виміряних різними способами при різних режимних і погодних умовах, використовуються їх кількісні і якісні характеристики. До основних характеристик відносяться [6, 8, 9]:

- середньорічні втрати потужності на корону;
- середні і максимальні втрати;
- питомі втрати;
- питомі скорочені втрати;
- залежність питомих втрат від напруги;
- імовірнісні характеристики питомих втрат потужності і щільності ймовірностей питомих втрат і ін.

На практиці, для оцінки втрат при інженерних розрахунках, в основному використовуються значення середньорічних втрат потужності на корону і характеристики залежностей втрат на корону від напруги.

«Керівні вказівки щодо обліку втрат на корону і перешкод від корони» виділяють чотири основні групи погодних умов, кожній з яких відповідає свій середній рівень втрат електроенергії на корону [8]:

- перша група – хороша погода;
- друга – сухий сніг;
- третя – дощ;
- четверта – паморозь.

Тривалість впливу погодних умов окремих груп на тривалість існування корони і її характеристики може зменшуватися під впливом нагріву проводів струмом навантаження. При густині струму вище деяких значень, що називаються критичними, на поверхні проводів не утворюються атмосферні відкладення у вигляді інею, роси, кристалічної паморозі або дрібних крапельок води (туман, підвищена вологість повітря, дощ малої інтенсивності). Внаслідок цього втрати на корону при зазначених метеорологічних умовах не перевищують рівнів втрат для умов гарної погоди.

Для струмових навантажень нижче критичних значень існує додаткова диференціація груп видів погодних умов:

- п'ята група – кристалічна паморозь;
- шоста група – іній;

- сьома група – роса;
- восьма група – туман (сильний та помірний);
- дев'ята група – дощ з інтенсивністю вище критичної;
- десята група – погода з підвищеною вологістю повітря.

В цілому, рекомендації, наведені у керівних вказівках [8], у ряді випадків не відповідають експериментальним даним для розщеплених проводів високовольтних ЛЕП, не враховують багатьох факторів, що впливають на корону, і тому вимагають подальшого вдосконалення.

У програмах оптимізації режимів ЕЕС, як правило, не враховуються зміни параметрів ЛЕП, обумовлених впливом метеоумов і струму навантаження лінії. На зміни параметрів впливають і інші фактори: забруднення проводів, корозія і т. п., вплив яких також не враховується.

Отримані експериментальні залежності $\Delta P_k = f(U)$ [10, 11] орієнтовані на використання лише для чотирьох основних груп погодних умов. А для інших груп погодних умов втрати потужності на корону не визначаються, що веде до спотворення величини цих втрат.

В існуючих програмах оптимізації режимів лінії електропередачі, нелінійні залежності $\Delta P_k = f(U)$ представляються поліномами фіксованих ступенів виду [10]

$$\Delta P = \left[a_0 + a_1 \left(\frac{U_P}{U_H} \right) + a_2 \left(\frac{U_P}{U_H} \right)^2 + \dots + a_k \left(\frac{U_P}{U_H} \right)^k \right] l, \quad (5)$$

де U_P та U_H – відповідно, реальні і номінальні вузлові напруги;
 l – довжина лінії.

Так, у програмно-обчислювальному комплексі «Космос» нелінійні залежності $\Delta P_k = f(U)$ представлені рівнянням параболи другого порядку [12].

Розглянуті методи визначення реальних залежностей втрат потужності на корону від напруги в високовольтних ЛЕП змінного струму дозволяють на відрізках стаціонарності здійснювати оперативну корекцію залежностей $\Delta P_k = f(U)$ в моделях ЕЕС [12].

Таким чином, в результаті оптимізації більш точно розраховуються значення рівнів напруг, при яких сумарні втрати активної потужності (навантажувальні і на корону) є мінімальними.

На основі матеріалів ДП «НЕК «Укренерго», отриманих шляхом відповідних вимірювань на ЛЕП 750 кВ для чотирьох типів погоди (Рис. 1) отримані залежності питомих втрат на корону від напруги.

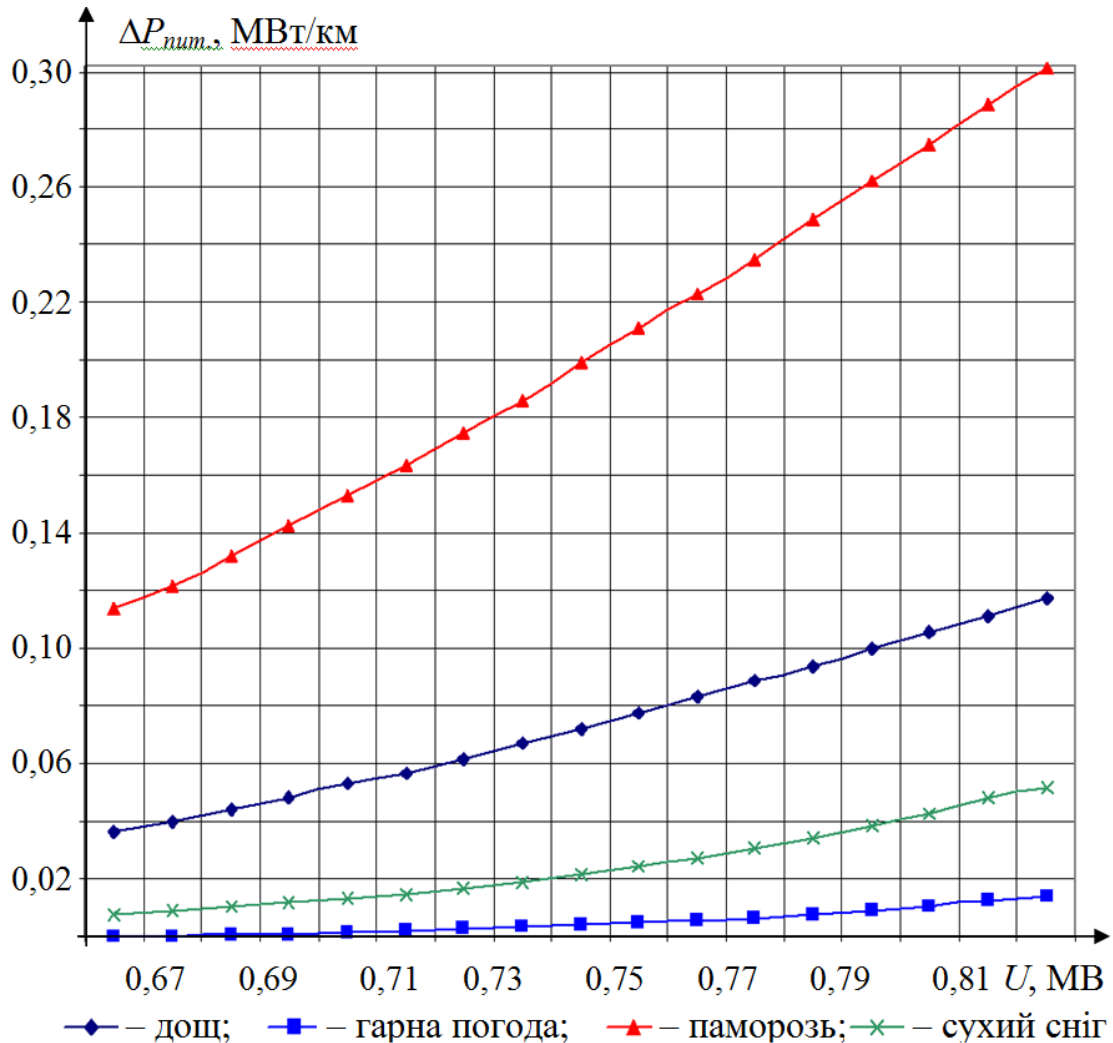


Рис. 1. Залежність питомих втрат активної потужності на корону від напруги на ЛЕП 750 кВ для типових погодних умов

Як видно з рис. 1, характер залежностей втрат потужності на корону для заданих груп погодних вказує на їх збільшення із підвищенням напруги ВПЛ. Значною мірою втрати збільшуються під час дощу та при відкладенні на проводах паморозі.

Здійснюючи в процесі експлуатації безперервний моніторинг втрат активної потужності на корону, можна перед виконанням оптимізації здійснити перевірку відповідності наявної типової залежності ($\Delta P_k = f(U)$) реальним експлуатаційним умовам.

Наведені залежності втрат на корону по ЛЕП 750 кВ дають переконливі докази необхідності регулювання напруги з метою зниження втрат. Якби в цей період несприятливих погодних умов (дощь, паморозь) напруга мережі 750 кВ була знижена на 2%, то втрати на корону зменшилися б на 10% [13].



Висновок. Встановлено, що втрати потужності та електричної енергії на корону в ПЛ змінюються в дуже широкому діапазоні, при цьому зміна втрат в часі протікає інколи дуже швидко. Таким чином, періодичні вимірювання на контрольованих прольотах не дозволяють отримати достовірні значення середніх і максимальних втрат на корону, що значно зменшує достовірність визначення втрат.

Запропоновано застосувати методику оперативного визначення втрат активної потужності та енергії (навантажувальних і на корону) на основі синхронізованих за часом по-фазних вимірів параметрів режиму по кінцях ВПЛ (струмів, напруг і кутів зсуву між ними) за допомогою сучасних засобів реєстрації інформації та корегування пасивних параметрів ВПЛ для уточнення рівня втрат та прийняття рішень для їх зменшення шляхом регулювання напруги в мережі.

Список використаних джерел

1. Головна сторінка. *Національна енергетична компанія «Укренерго»*: веб-сайт. URL: <https://ua.energy/>. (дата звернення: 12.12.2018).
2. Річні звіти. *Національна енергетична компанія «Укренерго»*: веб-сайт. URL: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/richni-zvity/>. (дата звернення: 12.12.2018).
3. Дніпровська ЕС. *Національна енергетична компанія «Укренерго»*: веб-сайт. URL: <https://ua.energy/about/struktura/dniprovska-es/>. (дата звернення: 12.12.2018).
4. Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання. URL: http://www.leonorm.com/p/NL_DOC/UA/201301/Nak399.htm (дата звернення: 15.12.2018).
5. *Тамазов А. И.* О проблемах расчета потерь на корону воздушных линий электропередачи. *Электричество*. 2009. № 7. С. 20-27.
6. *Тамазов А. И.* Корона на проводах воздушных линий переменного тока. Москва: Компания Спутник, 2002. 318 с.
7. *Черненко П. А., Волхонский А. С.* Оперативное определение потерь мощности с идентификацией пассивных параметров ЛЭП 750кВ. *Технічна електродинаміка*. 2004. Ч. 2. С. 33-36.
8. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750 кВ и постоянного тока 800-1500 кВ. Москва: Специализированный центр научно-технической информации. 1974. 74 с.
9. *Черненко П. А., Волхонский А. С.* Повышение точности определения активных сопротивлений и проводимостей линий электропередач. *Новини енергетики*. 2004. № 1. С. 45-48.



10. Черненко П. А., Волхонский А. С. Оперативное определение зависимости потерь на корону от напряжения в высоковольтных линиях. *Новини енергетики*. 2005. № 12. С. 32-38.

11. Черненко П. А., Волхонский А. С. Идентификация пассивных параметров высоковольтных линий в процессе эксплуатации. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2006. № 2 (14). С. 58-61.

12. Прихно В. Л. Программный комплекс «Космос» для оперативных расчетов режимов энергосистем на основе телеметрической информации. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2000. № 1. С. 118-127.

13. Измерение потерь на корону в линиях электропередачи / А. И. Тамазов, Е. В. Кравченко, Г. К. Кривоблоцкий, А. Б. Баламетов // Управляемые электропередачи. Кишинев: Наука, 1992. С. 33-46.

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МАГИСТРАЛЬНЫХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 330-750 кВ

Коваленко А. И., Коваленко Л. Р.

Аннотация – рассмотрены пути повышения эффективности передачи электроэнергии в сетях напряжением 330-750 кВ. Эффективность передачи электрической энергии снижается за счет имеющихся технологических потерь в элементах электрической сети. Основными технологическими потерями являются нагрузочные потери в элементах сети и потери на корону в проводах воздушных линий. Предложено контролировать в реальном времени нагрузочные потери и потери мощности на корону в магистральных воздушных линиях электропередачи. Потери мощности на корону существенно зависят от погодных условий и уровня напряжения в сети. Незначительное снижение напряжения в сети во время дождя и при отложении на проводах изморози позволит существенно сократить потери электрической энергии в проводах высоковольтных воздушных линий.

Ключевые слова: эффективность передачи электроэнергии, технологические потери электроэнергии, нагрузочные потери, потери мощности на корону, уровень напряжения, погодные условия.



THE ANALYSIS OF METHODS OF INCREASING OF THE ELECTRICAL POWER TRANSMISSION EFFICIENCY IN 330-750 kV MAIN POWER TRANSMISSION LINES

O. Kovalenko, L. Kovalenko

Summary

The problem of distribution power losses is one of the most important in the electrical energy industry. Cost-effective and efficient electrical power transmission requires the minimization of power losses in power network grid elements.

Methods of increasing of electrical power transmission efficiency in 330-750 kV lines are studied. Power transmission efficiency decreases due to existing technological power losses in different parts of the power grid. Main technological power losses are load losses in grid elements and corona losses in overhead lines. Real-time monitoring of load and corona losses in main overhead power transmission lines is suggested.

Load power losses in overhead high-voltage lines are higher than corona losses under good weather conditions but corona losses increase significantly under heavy weather conditions (snow, rain, icing, frosting).

The development of continuous power line corona losses measurement system is a necessary base for working mode optimizing by voltage, and power flows.

Corona losses significantly depend on weather conditions and grid voltage. The collected data of corona losses to power line voltage ratios under different weather conditions in 750 kV power line show strong evidence of the necessity of voltage regulating in order to reduce power losses.

Minor reducing of grid voltage during rain or lines icing leads to a significant decrease of power losses in high-voltage overhead power lines.

Key words: electrical power transmission efficiency, technological losses of electrical power, load losses, corona losses, voltage, weather conditions, voltage regulation.