ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2010. Т. LXIII, № 4.

УДК 621.317

ЭНЕРГЕТИКА

Л.В. ЕГИАЗАРЯН, В.С. САФАРЯН, Л.О. КАРАХАНЯН, А.С. АРУТЮНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ С РАСПОЛОЖЕННЫМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ПРОВОДАМИ

На основе аналитического метода расчета напряженности электрического поля (ЭП) трехфазной воздушной линии проанализирована интенсивность ЭП в пространстве между фазными проводами и землей. По результатам численного расчета напряженности ЭП показано, что вектор напряженности никогда не обращается в нуль, а описывает в течение одного периода синусоидальных фазных напряжений эллипс. Определены экстремальные значения напряженности (большая и малая оси эллипса).

Ключевые слова: высоковольтные воздушные линии, электрическое поле, вертикальная и горизонтальная составляющие вектора напряженности.

В настоящее время всё большее внимание уделяется биологическому и физиологическому влиянию высоковольтных линий (ВЛ) электропередачи. Основным показателем указанного влияния является напряженность ЭП, посредством которой определяется степень её влияния на обслуживающих электроустановки людей и окружающую среду [2-4]. В связи с этим важной задачей является получение профилей распределения напряженности ЭП в пространстве между фазными проводами ВЛ и поверхностью земли с учётом вращающегося характера ЭП трехфазной линии, чтобы выяснить, опасны ли эти поля для людей и жизни живых организмов. При этом вектор напряженности ЭП ВЛ в течение периода синусоидально изменяющихся фазных напряжений не обращается в нуль, описывая эллипс (в некоторых точках – окружность).

В настоящей статье приводятся результаты аналитического расчета вертикальной и горизонтальной составляющих вектора напряженности электрического поля ВЛ и дается анализ полученных численных значений напряженности на примере реальных геометрических параметров линии 220 кВ.

На рис. 1 показаны сечения трехфазных проводов раднуса r_n с расстоянием между фазами D и высотой геометрических центров фаз над землей, равной H. Показаны также зеркальные отображения центров фаз в плоскости земли. Линейные плотности зарядов фазных проводов обозначены через τ_1 , τ_2 , τ_3 , а зеркальных отображений – через $-\tau_1$, $-\tau_2$ II $-\tau_3$.

Вектор напряженности ЭП в точке, находящейся на расстоянии х по горизонтальной оси и у по вертикальной оси (рис. 1), определяется геометрическим суммированием его составляющих от зарядов τ_1 , τ_2 , τ_3 , $-\tau_1$, $-\tau_2$, $-\tau_3$, соответствующих фазам A, B, C.

Мгновенные значения вертикальной (E_y) и горизонтальной (E_x) составляющих напряженности ЭП в рассматриваемой точке равны соответственно:



Рис. 1. К определению вектора напряженности ЭП трехфазной линии

Предполагается, что сумма зарядов всех фаз равна нулю: $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0$.

(3)

Выразив т₂ через т₁ и т₃, уравнение (2) принимает следующий вид:

$$E_{x}(t) = \frac{\tau_{1}}{2\pi\epsilon_{0}} \left[\frac{x}{(H-y)^{2} + x^{2}} - \frac{D+x}{(H-y)^{2} + (D+x)^{2}} - \frac{x}{(H+y)^{2} + x^{2}} + \frac{D+x}{(H+y)^{2} + (D+x)^{2}} \right] + \frac{\tau_{3}}{2\pi\epsilon_{0}} \left[\frac{2D+x}{(H-y)^{2} + (2D+x)^{2}} - \frac{D+x}{(H-y)^{2} + (D+x)^{2}} + \frac{D+x}{(H+y)^{2} + (D+x)^{2}} - \frac{2D+x}{(H+y)^{2} + (2D+x)^{2}} \right]$$
(4)

В комплексной форме E_x и E_y выражаются аналогично, заменяя мгновенные значения τ_1 , τ_2 , τ_3 на их комплексы $\dot{\tau}_1$, $\dot{\tau}_2$, $\dot{\tau}_3$. Комплексные значения линейных плотностей зарядов можно выразить через линейные напряжения $\dot{U}_{12}, \dot{U}_{23}$ и $\dot{U}_{3}, [1]:$

$$\dot{\tau}_{1} = \pi\epsilon_{0} \frac{\dot{U}_{12}F + \dot{U}_{23}G}{F^{2} - G^{2}}, \ \dot{\tau}_{2} = \pi\epsilon_{0} \frac{\dot{U}_{23} - \dot{U}_{12}}{F + G}, \ \dot{\tau}_{3} = -\pi\epsilon_{0} \frac{U_{23}F + U_{12}G}{F^{2} - G^{2}},$$

где постоянные F и G определяются геометрическими параметрами г_п, D, H следующими выражениями:

$$F = Ln \frac{2DH}{r_n \sqrt{(2H)^2 + D^2}}.$$
 (5)

$$G = 0.5Ln \frac{2DH\sqrt{H^2 + D^2}}{r_n \sqrt{(2H)^2 + D^2}}$$
 (6)

Покажем, что сдвиг фаз между горизонтальной и вертикальной составляющими напряженности равен π/2. Преобразуя формулы, определяющие E, и E, с учетом (5) и (6) получим

$$\dot{E}_{x} = \frac{\tau_{1} - \tau_{3}}{2\pi\varepsilon_{0}} \left[\frac{D}{(H+y)^{2} + D^{2}} - \frac{D}{(H-y)^{2} + D^{2}} \right] = \frac{F+G}{2(F^{2} - G^{2})} (U_{12} + U_{23}),$$
(7)

$$\dot{E}_{y} = \frac{1}{2} \frac{G - F}{G^{2} - F^{2}} \left[\dot{U}_{23} - \dot{U}_{12} \left[\frac{H - y}{(H - y)^{2} + D^{2}} + \frac{H + y}{(H + y)^{2} + D^{2}} - \frac{1}{H - y} - \frac{1}{H + y^{1}} \right].$$
 (8)



Рис. 2. Векторная диаграмма линейных напряжений

На рис. 2 представлены векторы симметричных напряжений Ú₁₂, Ú₂₃, а также Ú₁₂ + Ú₂₃ и Ú₂₃ – Ú₁₂ (при условии Ú₂₃ = U₂₃). Из диаграммы следует, что

$$u_{12} + u_{23} = \sqrt{2} \, \text{U} \sin(\omega t + 60^\circ)$$

83

$$u_{23} - u_{12} = \sqrt{2} U \sin(\omega t - 30^\circ)$$
.

Таким образом, векторы E_x и E_y перпендикулярны и сдвинуты по фазе на 90°, что подтверждает вращающийся характер ЭП трехфазной линии.

Углы направления вектора напряженности ψ_m , соответствующие его экстремальным модулям, получаем из равенства нулю производной È по wглу ψ :

$$\frac{dE}{d\psi} = \frac{1}{2E} \Big[(E_y^2 - E_x^2) \sin(2\psi_m) + 2E_y E_x \cos(\psi_x - \psi_y) \cos(2\psi_m) \Big] = 0, \qquad (9)$$

откуда

$$tg(2\psi_{m}) = \frac{2E_{y}E_{x}\cos(\psi_{x} - \psi_{y})}{E_{x}^{2} - E_{y}^{2}}.$$
 (10)

Одно значение этого угла дает направление максимального вектора попя Е_{тта}, второе – направление Е_{тт}.

Окончательно для Е мак и Е получаются следующие формулы:

$$E_{max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(E_{xm}^2 + E_{ym}^2) + \sqrt{E_{xm}^4 + E_{ym}^4 + 2E_{xm}^2 E_{xm}^2 E_{ym}^2 \cos(2(\psi_x - \psi_y))}, \quad (11)$$

$$E_{min} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(E_{xm}^2 + E_{ym}^2) - \sqrt{E_{xm}^4 + E_{ym}^4 + 2E_{xm}^2 E_{ym}^2 \cos(2(\psi_x - \psi_y))}} .$$
(12)

Угол наклона большой оси эллипса к координатной оси ох определяется по известным значениям E_x, E_y, ψ_x , ψ_y :

$$\gamma = \frac{1}{2} \arctan \frac{2E_{xm}E_{ym}\cos(\psi_x - \psi_y)}{E_{xm}^2 - E_{ym}^2}.$$
 (13)

Результаты расчета распределения вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности электрического поля ВЛ 220 кВ по формулам (7) и (8) для разных высот у над землей приведены на рис. 3-5. Для указанной ВЛ геометрические параметры имели следующие значения: г_n=1,51 см, D=7 м, H=7,5 м. Согласно (7), на поверхности земли (у=0) горизонтальная составляющая напряженности равна нулю, и имеется только составляющая E_y. В связи с этим графики зависимости E_x и E_y от координаты x, построены начиная с y=0,2 м.

С увеличением высоты над землей возникает составляющая E_x, имеюцая максимумы в точках а и b, отстоящих от проекции крайней фазы на 10 и 3 *м* соответственно. Вертикальная составляющая E_y в этих же точках имеет наименьшее значение.

Как видно из рис. 3-5, существуют две точки расчетного промежутка иежду фазными проводами, в которых вертикальная составляющая прини-

мает максимальные значения (точки с и d). Абсциссы этих точек равны 15 и 1 м соответственно.



Рис. 3. Зависимость вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности от координаты х при у=0,2 м







В середине между крайними фазами горизонтальная и вертикальная составляющие принимают экстремальные значения: E_{ymax} и E_{xmax} . С удалением от поверхности земли к фазным проводам наблюдается существенное возрастание горизонтальной составляющей E_x и сближение к значениям вертикальной составляющей E_y .

На рис. 6 представлен эллипс – геометрическое место конца вектора напряженности в точке с координатами у=2,4 м и х=0 (под первой фазой).

Длины полуосей эллипса соответственно равны E_{max} =5,894 *кВ/м* и E_{min} =1,046 *кВ/м*. Угол наклона длинной оси к горизонту составил γ=0,214 *рад*.

у=1.8 м



Рис. 5. Зависимость вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности от координаты х при у=1,8 м



Рис. 6. Геометрическое место конца вектора напряженности в точке с координатами y = 2,4 *м* и x = 0

По результатам численного расчета составляющих напряженности электрического поля ВЛ 220 кВ E_x . Е, и экстремальных значений вектора на рис о построен описанный им эллипс для точки с координатами x=0, y=2,4 м от поверхности земли (под первой фазой).

Выводы

1. Электрическое поле трехфазной ВЛ имеет эллиптическую поляризацию, достигая максимума в зоне между соседними фазами. Максимальные значения напряженности электрического поля ВЛ 220 кВ вблизи земли возникают на расстояниях 1...2 м от проекции на землю країних фаз, где поляризация поля близка к линейной.

 Вблизи поверхности земли, в зоне наибольшего экологического воздействия электрического поля ВЛ на людей и биообъекты, вертикальная составляющая поля значительно больше горизонтальной и слабо изменяется с высотой.

 Обычный способ расчета модуля вектора напряженности ЭП трехфазной ВЛ путем квадратного суммирования модулей горизонтальной и вертикальной составляющих вектора является ошибочным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Цицикян Г.Н. Расчет электрического поля высоковольтной линии на уровне земли // Электричество. – 2005. - № 6. - С. 59-63.
- Пучков Г.Г., Перепьман Л.С., Задорожная М.Н. Электрические поля электропередачи СВН и их моделирование // Электропередачи сверхвысокого напряжения и экология: Научные труды ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. – М., 1988. - С. 140-153.
- Расчет и измерение напряженности электрического поля в электроустановках сверхи ультравысокого напряжения / С.В. Бирюков, Ф.Г. Кайданов и др. – В кн.: Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: Пер. докл. Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ – 86). – М.: Энергоатомиздат, 1988. - С. 6-11.
- 4. Кайданов Ф.Г. Моделирование электрических полей для изучения их влияния на человека // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1984. №1. С. 123-130.

ЗАО "НИИ Энергетики". Материал поступил в редакцию 07.09.2009.

Լ.Վ. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ, 🧧 Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Լ.Վ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ, Ա.Ս. ՎԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

էլեկտրական դաշտի լարվածության (էՂ) հաշվարկի անալիտիկ մեթոդի հիման վրա վերլուծվել է դաշտի ինտենսիվությունը՝ ֆազային հաղորդալարերի և գետնի միջև տարածության կետերում։ էՂ թվային հաշվարկի արդյունքների հիման վրա ցույց է տրված, որ լարվածության վեկտորը ժամանակի ընթացքում զրոյի չի հավասարվում և մեկ պարբերության ընթացքում գծում է էլիպս։ Որոշված են լարվածության առավելագույն և նվազագույն արժեքները (էլիպսի մեծ և փոքր կիսաառանցքների երկարությունները)։

Առանցքային բառեր, բարձրավոլտ օդային գծեր, էլեկտրական դաշտ, լարվածության ուղղածիգ և հորիզոնական բաղադրիչներ։

L.V. YEGHIAZARYAN, V.S. SAFARYAN, L.H. KARAKHANYAN, A.S. HARUTYUNYAN

RESEARCH OF ELECTRIC FIELD OF A THREE-PHASE LINE WITH THE WIRES LOCATED IN A HORIZONTAL PLANE

Based on analytical method of calculation of electric field intensity (EFI) for a threephase overhead line the intensity of electric field in space between phase wires and the earth is analysed. By results of numeric calculations of EFI, it is shown that intensity vector never changes to zero, and it describes an ellipse during one period of sinusoidal phase voltages. Extreme values of intensity (the big and small axes of the ellipse) are defined.

Keywords: high-voltage overhead lines, electric field, vertical and horizontal components of intensity vector.