

Л.О. КАРАХАНИЯН, Б.Т. ГНУНИ

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХЦЕПНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 400 кВ АРМЕНИЯ - ИРАН

Разработана математическая модель расчета установившегося режима двухцепной линии электропередачи (ЛЭП) 400 кВ, в которой учтено наличие гроззащитных тросов, потерь на корону и поперечных емкостей, а также несимметричных магнитных связей. Приведены результаты исследования работы ЛЭП в разных аварийных режимах.

Ключевые слова: двухцепная ЛЭП, корона, аварийный режим, собственная и взаимная индуктивность, короткое замыкание, неполнофазный режим.

В связи с предстоящим вводом в эксплуатацию двухцепной ЛЭП 400 кВ Армения – Иран протяженностью 300 км возникает необходимость расчета и анализа аварийных режимов ее работы. При исследовании режимов работы ЛЭП требуется учет потерь электроэнергии на корону, поскольку величина годовых потерь энергии на корону имеет ощутимое значение и может достигать до 40% от потерь на нагрев проводов. Оценка величины потерь энергии на корону проводится на основе экспериментально полученных данных [1, 2].

Для расчета режимов двухцепной ЛЭП 400 кВ Армения – Иран составим ее схему замещения (рис. 1).

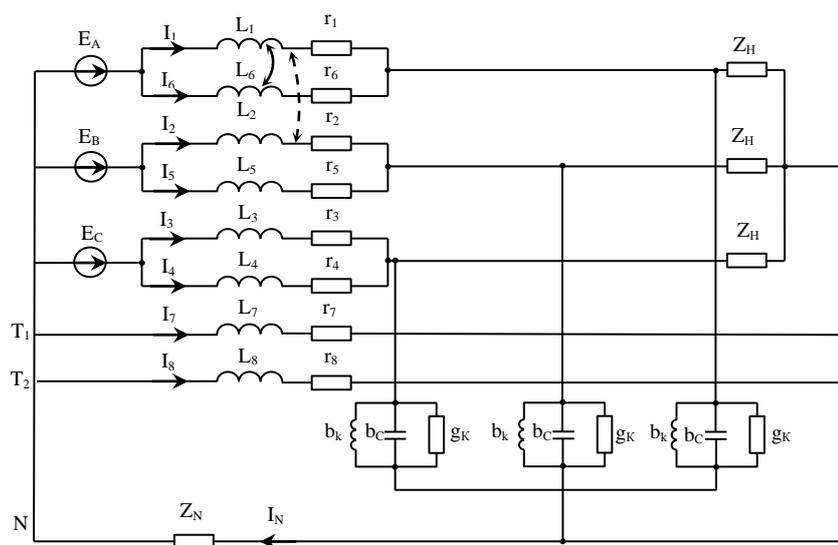


Рис. 1. Схема замещения ЛЭП 400 кВ Армения – Иран под нагрузкой

Записанная на основе законов Кирхгофа для схемы замещения ЛЭП 400 кВ (рис. 1) система уравнений установившегося режима имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_A = \dot{I}_1 r_1 + Z^*(\dot{I}_1 + \dot{I}_6) + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{1j} \dot{I}_j, \\ \dot{E}_B = \dot{I}_2 r_2 + Z^*(\dot{I}_2 + \dot{I}_5) + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{2j} \dot{I}_j, \\ \dot{E}_C = \dot{I}_3 r_3 + Z^*(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{3j} \dot{I}_j, \\ \dot{E}_C = \dot{I}_4 r_4 + Z^*(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{4j} \dot{I}_j, \\ \dot{E}_B = \dot{I}_5 r_5 + Z^*(\dot{I}_2 + \dot{I}_5) + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{5j} \dot{I}_j, \\ \dot{E}_A = \dot{I}_6 r_6 + Z^*(\dot{I}_1 + \dot{I}_6) + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{6j} \dot{I}_j, \\ 0 = \dot{I}_7 r_7 + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{7j} \dot{I}_j, \\ 0 = \dot{I}_8 r_8 + \dot{I}_N Z_N + j\omega \sum_{j=1}^8 M_{8j} \dot{I}_j, \\ \dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_6 + \dot{I}_7 + \dot{I}_8, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $Z^* = \frac{Z_H \cdot Z'}{Z_H + Z'}$, $Z' = Y^{-1} = \frac{1}{g_K + j(b_c + b_k)}$; g_K - активная проводимость потерь на корону ($g_K = 3,6403 \cdot 10^{-5}$ См); b_c - реактивная проводимость поперечной емкости ($b_c = 2,2 \cdot 10^{-3}$ См); b_k - индуктивная проводимость компенсирующего реактора ($b_k = 3,8 \cdot 10^{-3}$ См); \dot{I}_i , $i = \overline{1,8}$ - комплексные величины токов соответственно в фазных проводах и тросах; \dot{I}_N - ток, протекающий по земле; $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ - комплексные величины фазных ЭДС; $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 7,5$ Ом - активное сопротивление фазных проводов; $r_7 = r_8 = 50$ Ом - активное сопротивление грозозащитных тросов; $Z_N = R_N + jX_N = 13,067 + j5,026$ Ом - сопротивление земли; Z_H - сопротивление нагрузки ($R_H = 124$ Ом, $\cos \varphi = 0,85$); $\omega = 314$ рад/с - угловая частота; $M_{i,j}$ - собственные и взаимные индуктивности ЛЭП ($L_i = M_{i,i}$, $i = \overline{1,8}$).

Индуктивности L_i и $M_{i,j}$ выражаются следующими формулами [3,4]:

$$L_i = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r_s} - 1 \right), \quad (2)$$

$$M_{i,j} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{h_{nm}} - 1 \right), \quad (3)$$

где r_s - эквивалентный радиус сечения расщепленных проводов фаз, или радиус сечения грозозащитного троса, $r_s = \sqrt{r \cdot D} = \sqrt{1,58 \cdot 10^{-2} \cdot 0,36} = 0,0754$ м (r - радиус сечения проводов ($r = 0,0158$ м); D - расстояние между двумя расщепленными фазами ($D = 0,36$ м)); $r_t = 0,015$ м; h_{nm} - расстояние между осями проводов; μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); l - общая длина ЛЭП 400 кВ Армения - Иран ($l = 300$ км).

Значения собственных и взаимных индуктивностей проводов ЛЭП 400 кВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения собственных и взаимных индуктивностей проводов ЛЭП 400 кВ

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0,9534 | 0,6572 | 0,6242 | 0,6572 | 0,6242 | 0,6156 | 0,6632 | 0,6400 |
| 2 | 0,6572 | 0,9534 | 0,6572 | 0,6242 | 0,6156 | 0,6242 | 0,6204 | 0,6071 |
| 3 | 0,6242 | 0,6572 | 0,9534 | 0,6156 | 0,6242 | 0,6572 | 0,5990 | 0,5951 |
| 4 | 0,6572 | 0,6242 | 0,6156 | 0,9534 | 0,6572 | 0,6242 | 0,6400 | 0,6632 |
| 5 | 0,6242 | 0,6156 | 0,6242 | 0,6572 | 0,9534 | 0,6572 | 0,6071 | 0,6204 |
| 6 | 0,6156 | 0,6242 | 0,6572 | 0,6242 | 0,6572 | 0,9534 | 0,5951 | 0,5990 |
| 7 | 0,6632 | 0,6204 | 0,5990 | 0,6400 | 0,6071 | 0,5951 | 1,0503 | 0,6601 |
| 8 | 0,6400 | 0,6071 | 0,5951 | 0,6632 | 0,6204 | 0,5990 | 0,6601 | 1,0503 |

Рассмотрим следующие аварийные режимы работы ЛЭП:

- однофазное короткое замыкание (к.з. на фазе В);
- двухфазное короткое замыкание (к.з. на фазах В и С);
- неполнофазные режимы (при отключении фазы В на одной из цепей);
- отключена одна цепь.

Для имитации режима однофазного короткого замыкания на ЛЭП и расчета фазных токов в ЛЭП необходимо в модели (1) активное сопротивление потерь на корону одной из фаз приравнять к нулю. В качестве расчётного принят случай

к.з. на фазе В ($\frac{1}{g_{KB}} = 0$ Ом). Рассчитанные по (1) для однофазного к.з. комплекс-

ные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах приведены в табл. 2.

Таблица 2

Комплексные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах при однофазном к.з.

| N | \dot{i}, A | $ \dot{i} , A$ |
|----|------------------|----------------|
| 1 | 1064,8 + j355,8 | 1122,6 |
| 2 | -1631,7 - j203,5 | 1644,4 |
| 3 | 1,1 + j732,2 | 732,2 |
| 4 | -144,3 + j906,2 | 917,6 |
| 5 | -1633,6 - j203,5 | 1646,3 |
| 6 | 1205,2 + j181,6 | 1218,8 |
| T1 | 417 - j621,7 | 748,6 |
| T2 | 477,9 - j624,1 | 786 |
| N | -243,7 + j522,9 | 576,9 |

При этом напряжения на фазах нагрузки примут значения

$$U_{наз.А} = |(\dot{I}_1 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 368,58 \text{ кВ}, \quad U_{наз.В} = |(\dot{I}_2 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 0 \text{ кВ},$$

$$U_{наз.С} = |(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) \cdot Z^*| = 259,86 \text{ кВ}.$$

Аналогичным образом можно рассчитать токи в фазных проводах и напряжения на нагрузках при двухфазном к.з., приравняв в модели (1) к нулю активные сопротивления потерь на корону двух фаз. В качестве расчётного принят случай двухфазного к.з. на фазах В и С ($\frac{1}{g_{KB}} = 0 \text{ Ом}$ и $\frac{1}{g_{KC}} = 0 \text{ Ом}$). Рассчитанные по (1) для двухфазного к.з. комплексные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах приведены в табл. 3.

Таблица 3

Комплексные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах при двухфазном к.з.

| N | \dot{i}, A | $ \dot{i} , A$ |
|----|------------------|----------------|
| 1 | 1045 + j67,3 | 1047,2 |
| 2 | -2609,7 + j164,5 | 2614,9 |
| 3 | 1780,3 + j489,7 | 1846,4 |
| 4 | 1815 + j654,1 | 1929,3 |
| 5 | -2609 + j165,7 | 2614,3 |
| 6 | 1011,9 - j93,8 | 1016,3 |
| T1 | -139,6 - j526,6 | 544,8 |
| T2 | -162,1 - j564,9 | 587,6 |
| N | 131,8 + j356,1 | 379,8 |

При этом напряжения на нагрузках примут значения

$$U_{наг.А} = |(\dot{I}_1 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 325,05 \text{ кВ}, \quad U_{наг.В} = |(\dot{I}_2 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 0 \text{ кВ},$$

$$U_{наг.С} = |(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) \cdot Z^*| = 0 \text{ кВ}.$$

Для расчета режима работы ЛЭП в неполнофазном режиме необходимо в модели (1) приравнять к нулю активную проводимость данной фазы линии, имитируя таким образом разрыв фазы. В качестве расчётного принят случай разрыва фазы В на одной из цепей. Комплексные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах приведены в табл. 4.

Таблица 4

Комплексные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах при разрыве фазы на одной из цепей

| | \dot{I}, A | $ \dot{I} , A$ |
|----|------------------|----------------|
| 1 | 771,3 + j34,4 | 772,1 |
| 2 | 0 | 0 |
| 3 | -426,7 + j548,1 | 694,6 |
| 4 | -350,4 + j707,0 | 789,1 |
| 5 | -899,8 – j1081,8 | 1407,1 |
| 6 | 864 + j120 | 872,3 |
| T1 | -16,2 – j141,7 | 142,6 |
| T2 | 55,8 – j111,1 | 124,3 |
| N | -1,9 + j74,8 | 74,8 |

Для этого случая напряжения на нагрузках примут значения

$$U_{наг.А} = |(\dot{I}_1 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 259,54 \text{ кВ}, \quad U_{наг.В} = |(\dot{I}_2 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 222,33 \text{ кВ},$$

$$U_{наг.С} = |(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) \cdot Z^*| = 233,26 \text{ кВ}.$$

Для определения режима работы ЛЭП 400 кВ с отключенной одной цепью построим графики зависимости изменения передаваемой активной мощности (рис. 2) и напряжения на нагрузке (рис. 3) от величины активного сопротивления нагрузки, интервал изменения которого примем в пределах $R_H = [0, 700] \text{ Ом}$. Коэффициент мощности нагрузки принят неизменным и равным $\cos\varphi = 0,85$. Для увеличения пропускной способности ЛЭП при отключенной одной цепи используются индуктивные компенсаторы, проводимость которых для данного режима принята $b_K = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ См}$.

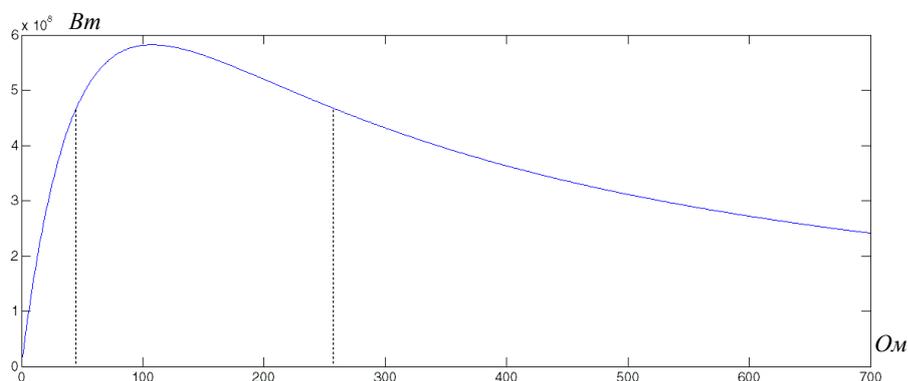


Рис. 2. Зависимость передаваемой по ЛЭП мощности от величины сопротивления при отключенной одной цепи

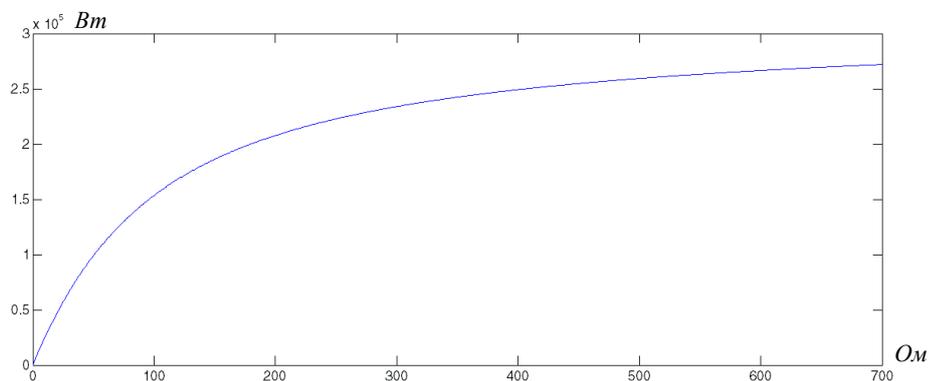


Рис. 3. Зависимость напряжения на нагрузке от величины сопротивления при отключенной одной цепи

С учетом требований по обеспечению 20%-го запаса по статической устойчивости получим условие длительно допустимого режима передачи мощности по ЛЭП, значение которой составит 465,53 МВт. Как видно из рис. 2, допустимый режим работы данной ЛЭП можно осуществить при двух различных значениях активного сопротивления нагрузки, а именно: при $R_{н1} = 46 \text{ Ом}$ и $R_{н2} = 259 \text{ Ом}$. Расчеты установившегося режима показывают, что экономически целесообразным является значение $R_{н} = 259 \text{ Ом}$.

Для рассматриваемого режима с учетом $R_{н} = 259 \text{ Ом}$ расчетные комплексные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах представлены в табл. 5.

Таблица 5

Комплексные значения и модули токов в фазных проводах и грозозащитных тросах при работе ЛЭП с отключенной одной цепью

| N | \dot{I}, A | $ \dot{I} , A$ |
|----|-----------------|----------------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 |
| 4 | -374,2 + j610,1 | 715,8 |
| 5 | -351,7 - j616 | 709,3 |
| 6 | 665 - j3,7 | 665 |
| T1 | 23,1 - j4,4 | 23,5 |
| T2 | 52,1 - j7,7 | 52,6 |
| N | 14,2 - j21,7 | 25,9 |

При этом напряжения на нагрузках примут значения

$$U_{наг.А} = |(\dot{I}_1 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 225,03 \text{ кВ}, \quad U_{наг.В} = |(\dot{I}_2 + \dot{I}_6) \cdot Z^*| = 240,01 \text{ кВ},$$

$$U_{наг.С} = |(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) \cdot Z^*| = 242,19 \text{ кВ}.$$

Потребляемая нагрузкой мощность составит

- для фазы А: $\tilde{S}_{наг.А} = U_{наг.А}^2 / Z_H^* = 141,26 + j87,543 \text{ МВА}$;
- для фазы В: $\tilde{S}_{наг.В} = U_{наг.В}^2 / Z_H^* = 160,7 + j99,592 \text{ МВА}$;
- для фазы С: $\tilde{S}_{наг.С} = U_{наг.С}^2 / Z_H^* = 163,63 + j101,41 \text{ МВА}$;

$$\sum \tilde{S}_{наг} = \tilde{S}_{наг.А} + \tilde{S}_{наг.В} + \tilde{S}_{наг.С} = 465,59 + j288,54 \text{ МВА}.$$

Выводы

1. На основе разработанной математической модели установившегося режима двухцепной ЛЭП проведены расчеты и исследованы параметры ее работы в различных аварийных режимах (несимметричные к.з. и неполнофазные режимы).
2. Для режима ЛЭП с отключенной одной цепью получены графики зависимости передаваемой мощности и напряжения на нагрузках от изменения сопротивления нагрузки.
3. Для режима ЛЭП с отключенной одной цепью получено значение длительно допустимой передаваемой активной мощности с учетом требований по обеспечению статической устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тамазов А.М.** Корона на проводах воздушных линий переменного тока. - М.: Компания “Спутник”, 2002. – 318 с.
2. **Егиазарян Л.В., Сафарян В.С., Караханян Л.О., Арутюнян А.С.** К вопросу уточнения расчета потерь мощности на корону в высокогорных воздушных линиях электропередачи // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2010.-Т. LXIV, N1.- С 63-69.
3. **Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.** Теоретические основы электротехники: Учебник для ВУЗ-ов. В 3-х томах: Том 3.- СПб.: Питер, 2004. – 377 с.
4. **Александров Г.Н.** Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения. – СПб.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

ЗАО “НИИ Энергетики”. Материал поступил в редакцию 10.07.2013.

Լ. Հ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ, Բ.Տ. ԳՆՈՒՆԻ

ՀԱՅԱՍՏԱՆ – ԻՐԱՆ 400 կՎ ԵՐԿՇՂԹԱ ԷԼԵԿՏՐԱՀԱՂՈՂՄԱՆ ԳԾԻ ՎԹԱՐԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ

Մշակված է երկշղթա էլեկտրահաղորդման գծի (ԷՀԳ) կայունացված ռեժիմի հետազոտման մաթեմատիկական մոդելը, որը հաշվի է առնում ամպրոպապաշտպան ճոպանները, պսակաձև պարպման և լայնական ունակությունների վրա կորուստները, ինչպես նաև ոչ համաչափ մագնիսական կապերը: Ներկայացված են երկշղթա ԷՀԳ-ի վթարային տարբեր ռեժիմների հետազոտության արդյունքները:

Առանցքային բաներ. Երկշղթա ԷՀԳ, պսակաձև պարպում, վթարային ռեժիմ, սեփական և փոխադարձ ինդուկտիվություն, կարճ միացում, ոչ լիաֆազ ռեժիմ:

L.H. KARAKHANYAN, B.T. GNUNI

INVESTIGATING THE EMERGENCY OPERATIONS OF A DOUBLE CIRCUIT 400 kV POWER LINE ARMENIA - IRAN

A mathematical model for calculating the established operation of a double-circuit 400 kV power line taking into account the presence of the overhead ground-wire cable, losses on the corona and the latitudinal capacities, as well as the asymmetric magnetic couplings is developed. The results of investigation of the power line operation at different emergency regimes are introduced.

Keywords: double circuit power line, corona, emergency operation, own and mutual inductance, short circuit, phase unbalance.