

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-141-153

## Угловая характеристика синхронного генератора, работающего через длинную линию, в паузу ОАПВ\*

Т.Г. КРАСИЛЬНИКОВА<sup>1,a</sup>, Г.И. САМОРОДОВ<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>2</sup> 630126, РФ, г. Новосибирск, ул. Кленовая, 10/1, Сибирский научно-исследовательский институт энергетики (СибНИИЭ)

<sup>a</sup> [tatka552005@ya.ru](mailto:tatka552005@ya.ru)    <sup>b</sup> [german-samorodov@ya.ru](mailto:german-samorodov@ya.ru)

В настоящей статье обсуждается проблема расчета угловой характеристики синхронного генератора, связанная с ликвидацией дуговых однофазных коротких замыканий в линиях сверхвысокого напряжения (СВН). В связи с большой длиной линий СВН такие аварии составляют подавляющую долю (98 %). При этом значительная часть (70 %) однофазных коротких замыканий (ОКЗ) представляет неустойчивые дуговые аварии, которые могут быть успешно ликвидированы в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Бестоковая пауза при ОАПВ зависит от величины токов дуги подпитки и находится в пределах 0,5...3,0 с. Поэтому представляет интерес анализ характера динамических переходов при использовании ОАПВ различной продолжительности и оценка уровня пропускной способности дальних электропередач СВН по условию динамической устойчивости. Особенности динамического перехода при определении аварии можно проследить с помощью угловых характеристик нормального режима, режима ОКЗ и ОАПВ. Однако в литературе отсутствует точный способ моделирования угловой характеристики в паузу ОАПВ, когда аварийная фаза отключена с двух сторон по концам линии. В статье предложен оригинальный точный алгоритм для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через ВЛ СВН в паузу ОАПВ, с целью оценки погрешности упрощенного моделирования угловой характеристики, когда двустороннее отключение фазы заменяется одним разрывом либо в начале, либо в конце линии. Результаты проведенных сравнительных расчетов применительно к ВЛ 500 кВ показывают, что упрощенный способ моделирования паузы ОАПВ может давать погрешность при определении максимума угловой характеристики. Поэтому в общем случае следует строго придерживаться способа моделирования паузы ОАПВ при определении угловой характеристики синхронного генератора, работающего на длинную линию.

**Ключевые слова:** дуговое однофазное короткое замыкание, однофазное автоматическое повторное включение, динамическая устойчивость, угловая характеристика, синхронный генератор, линия сверхвысокого напряжения, разрыв фазы, метод симметричных составляющих, погрешность расчетов

---

\* Статья получена 20 декабря 2018 г.

## ВВЕДЕНИЕ

При анализе динамической устойчивости при ликвидации дуговых однофазных коротких замыканий с использованием ОАПВ [1, 2] возникает задача моделирования угловой характеристики синхронного генератора, работающего через ВЛ сверхвысокого напряжения в паузу ОАПВ. Наличие двух разрывов по концам линии затрудняет решение этой задачи. Поэтому обычно используется упрощенный подход [3–15], при котором двойной разрыв заменяется одиночным разрывом на одном из концов линии, т. е. в начале или в конце линии. Однако в этом случае возникает потребность оценки погрешности, которая будет иметь место при использовании упрощенного подхода. В настоящей статье впервые приводится точное решение задачи при двустороннем разрыве аварийной фазы линии, что позволяет дать оценку погрешности при использовании упрощенного подхода с одиночным разрывом в начале или конце линии.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основываясь на методе симметричных составляющих, применительно к схеме электропередачи в режиме паузы ОАПВ (рис. 1) впервые обосновывается алгоритм для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через длинную линию, в паузу ОАПВ.

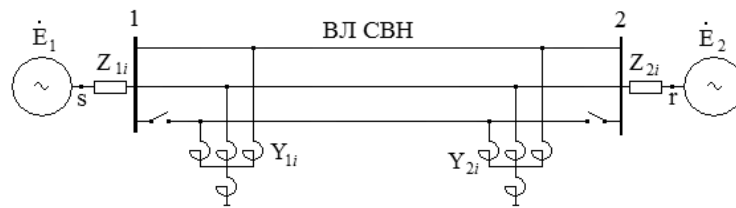


Рис. 1. Схема электропередачи в режиме паузы ОАПВ

Fig. 1. Transmission system scheme in the SPAR dead time

В случае упрощенного решения задачи, когда два разрыва по концам линии заменяются только одним разрывом либо в начале линии, либо в ее конце, как это показано на рис. 2, приводятся для удобства известные алгоритмы для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через длинную линию.

Далее проводится оценка погрешности определения угловой характеристики при упрощенном моделировании паузы ОАПВ на примере длинной линии 500 кВ.

## 2. УГЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИ ДВУСТОРОННЕМ РАЗРЫВЕ ЛИНИИ В РЕЖИМЕ ПАУЗЫ ОАПВ

Вывод точного алгоритма для определения угловой характеристики при двустороннем разрыве линии в режиме паузы ОАПВ основывается на использовании метода симметричных составляющих. На рис. 3 показана схема замещения  $i$ -й последовательности в режиме паузы ОАПВ.

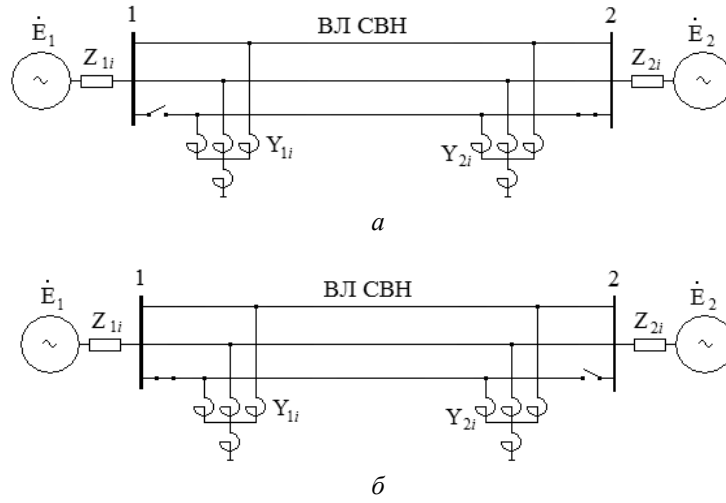


Рис. 2. Упрощенное моделирование паузы ОАПВ:

а – разрыв в начале ВЛ; б – разрыв в конце ВЛ

Fig. 2. Simplified simulation of the SPAR dead time:

a is an opening at the HL beginning; b is an opening at the HL end

Рис. 3. Схема замещения  $i$ -й последовательностиFig. 3. Equivalent circuit of the  $i$ -th sequence network

Примыкающие системы характеризуются лишь ЭДС прямой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1i}: \quad \dot{E}_{11} = \dot{E}, \quad \dot{E}_{12} = 0, \quad \dot{E}_{10} = 0, \\ \dot{E}_{2i}: \quad \dot{E}_{21} = \dot{E}, \quad \dot{E}_{22} = 0, \quad \dot{E}_{20} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, 0$  – индексы прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Схема на рис. 3 приводится к узлу 1, как показано на рис. 4.

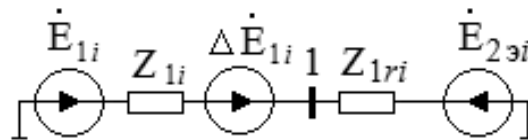


Рис. 4. Схема замещения после приведения к узлу 1

Fig. 4. Equivalent circuit after reduction to node 1

Из этой схемы вытекают следующие уравнения:

$$\dot{E}_{1i} + \Delta \dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2i} = Z_{1\Sigma i} \dot{I}_{1i}, \quad (2)$$

где  $\dot{E}_{2i} = \frac{\dot{E}_{2i} - \Delta \dot{U}_{2i}}{D_{1ri}}$ ,  $Z_{1\Sigma i} = Z_{1i} + Z_{1ri}$ ,  $Z_{1ri} = \frac{B_{1ri}}{D_{1ri}}$ ;  $B_{1ri}, D_{1ri}$  – коэффициенты четырехполюсника 1-г для  $i$ -й последовательности.

Схема на рис. 3 приводится к узлу 2, как показано на рис. 5.

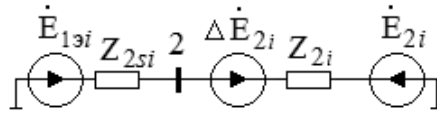


Рис. 5. Схема замещения после приведения к узлу 2

Fig. 5. Equivalent circuit after reduction to node 2

Из этой схемы вытекают следующие уравнения:

$$\dot{E}_{1i} + \Delta \dot{U}_{2i} - \dot{E}_{2i} = Z_{2\Sigma i} \dot{I}_{2i}, \quad (3)$$

где  $\dot{E}_{1i} = \frac{\dot{E}_{1i} - \Delta \dot{U}_{1i}}{A_{s2i}}$ ,  $Z_{2\Sigma i} = Z_{2i} + Z_{2si}$ ,  $Z_{2si} = \frac{B_{s2i}}{A_{s2i}}$ ;  $B_{s2i}, D_{s2i}$  – коэффициенты четырехполюсника s-2 для  $i$ -й последовательности.

В итоге имеем следующие системы уравнений, приведенные к узлу 1:

$$\dot{E}_1 + \Delta \dot{U}_1 - \frac{\dot{E}_2 - \Delta \dot{U}_2}{D_{1r}} = Z_{1\Sigma} \dot{I}_1, \quad (4)$$

$$\Delta \dot{U}_{12} + \frac{\Delta \dot{U}_{22}}{D_{1r2}} = Z_{1\Sigma 2} \dot{I}_{12}, \quad (5)$$

$$\Delta \dot{U}_{10} + \frac{\Delta \dot{U}_{20}}{D_{1r0}} = Z_{1\Sigma 0} \dot{I}_{10} \quad (6)$$

и к узлу 2:

$$\frac{\dot{E}_1 - \Delta \dot{U}_1}{A_{s2}} - \dot{E}_2 + \Delta \dot{U}_2 = Z_{2\Sigma} \dot{I}_2, \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \dot{U}_{12}}{A_{s22}} + \Delta \dot{U}_{22} = Z_{2\Sigma 2} \dot{I}_{22}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \dot{U}_{10}}{A_{s20}} + \Delta \dot{U}_{20} = Z_{2\Sigma 0} \dot{I}_{20}. \quad (9)$$

Граничные условия в местах разрыва:

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 + \dot{I}_{12} + \dot{I}_{10} &= 0, \\ \dot{I}_2 + \dot{I}_{22} + \dot{I}_{20} &= 0, \\ \Delta\dot{U}_1 &= \Delta\dot{U}_{12} = \Delta\dot{U}_{10}, \\ \Delta\dot{U}_2 &= \Delta\dot{U}_{22} = \Delta\dot{U}_{20}.\end{aligned}\tag{10}$$

Уравнения (4) и (7) преобразуются к следующему виду:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1\text{норм}} + \frac{\Delta\dot{U}_1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{\Delta\dot{U}_2}{Z_{1\Sigma}D_{1r}},\tag{11}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{2\text{норм}} - \frac{\Delta\dot{U}_1}{Z_{2\Sigma}A_{s2}} + \frac{\Delta\dot{U}_2}{Z_{1\Sigma}},\tag{12}$$

где  $\dot{I}_{1\text{норм}} = \frac{1}{Z_{1\Sigma}}\left(\dot{E}_1 - \frac{\dot{E}_2}{D_{1r}}\right)$ ,  $\dot{I}_{2\text{норм}} = \frac{1}{Z_{2\Sigma}}\left(\frac{\dot{E}_1}{A_{s2}} - \dot{E}_2\right)$  – токи нормального режима соответственно в пунктах 1 и 2.

Уравнения (5), (6) и (8), (9) с учетом граничных условий (10) приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned}Y_{1\text{э}}\Delta\dot{U}_1 + Y_{1r\text{э}}\Delta\dot{U}_2 &= -\dot{I}_1, \\ Y_{s2\text{э}}\Delta\dot{U}_1 + Y_{2\text{э}}\Delta\dot{U}_2 &= -\dot{I}_2,\end{aligned}\tag{13}$$

где

$$\begin{aligned}Y_{1\text{э}} &= \frac{1}{Z_{1\Sigma 2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 0}}, \quad Y_{1r\text{э}} = \frac{1}{Z_{1\Sigma 2}D_{1r2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 0}D_{1r0}}, \\ Y_{s2\text{э}} &= \frac{1}{Z_{2\Sigma 2}A_{s22}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma 0}D_{s20}}, \quad Y_{2\text{э}} = \frac{1}{Z_{2\Sigma 2}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma 0}}.\end{aligned}$$

Разрешив систему уравнений (13) относительно  $\Delta\dot{U}_1$  и  $\Delta\dot{U}_2$ , найдем

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_1 &= -\Delta Z_{11}\dot{I}_1 - \Delta Z_{12}\dot{I}_2, \\ \Delta\dot{U}_2 &= -\Delta Z_{21}\dot{I}_1 - \Delta Z_{22}\dot{I}_2.\end{aligned}\tag{14}$$

$$\text{где } MY = \begin{bmatrix} Y_{1\text{э}} & Y_{1r\text{э}} \\ Y_{s2\text{э}} & Y_{2\text{э}} \end{bmatrix}, \quad MY^{-1} = \begin{bmatrix} \Delta Z_{11} & \Delta Z_{12} \\ \Delta Z_{21} & \Delta Z_{22} \end{bmatrix}.$$

После подстановки (14) в (11) и (12) получим

$$\begin{aligned} K_{11}\dot{I}_1 + K_{12}\dot{I}_2 &= \dot{I}_{1\text{норм}}, \\ K_{21}\dot{I}_1 + K_{22}\dot{I}_2 &= \dot{I}_{2\text{норм}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} K_{11} &= 1 + \frac{\Delta Z_{11}}{Z_{1\Sigma}} + \frac{\Delta Z_{21}}{Z_{1\Sigma}D_{1r}}, \quad K_{12} = \frac{\Delta Z_{12}}{Z_{1\Sigma}} + \frac{\Delta Z_{22}}{Z_{1\Sigma}D_{1r}}, \\ K_{21} &= \frac{\Delta Z_{11}}{Z_{2\Sigma}A_{s2}} + \frac{\Delta Z_{21}}{Z_{2\Sigma}}, \quad K_{22} = 1 + \frac{\Delta Z_{12}}{Z_{2\Sigma}A_{s2}} + \frac{\Delta Z_{22}}{Z_{2\Sigma}}. \end{aligned}$$

Разрешив систему (15) относительно  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , найдем

$$\dot{I}_1 = \Delta K_{11}\dot{I}_{1\text{норм}} + \Delta K_{12}\dot{I}_{2\text{норм}}, \quad (16)$$

$$\dot{I}_2 = \Delta K_{21}\dot{I}_{1\text{норм}} + \Delta K_{22}\dot{I}_{2\text{норм}}, \quad (17)$$

где  $MK = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}$ ,  $MK^{-1} = \begin{bmatrix} \Delta K_{11} & \Delta K_{12} \\ \Delta K_{21} & \Delta K_{22} \end{bmatrix}$ .

Соответственно уравнение угловой характеристики со стороны узла 1 с учетом (16) в режиме паузы ОАПВ запишется как

$$P_{1\text{ОАПВ}} = \text{Re}\sqrt{3}\dot{E}_1\bar{I}_1 = \text{Re}\sqrt{3}\dot{E}_1(\Delta\bar{K}_{11}\bar{I}_{1\text{норм}} + \Delta\bar{K}_{12}\bar{I}_{2\text{норм}}). \quad (18)$$

### 3. УГЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ РАЗРЫВЕ ЛИНИИ, УПРОЩЕННО МОДЕЛИРУЮЩЕМ РЕЖИМ ПАУЗЫ ОАПВ

Получим необходимые соотношения для случая одностороннего разрыва в начале линии (рис. 2, а). ЭДС примыкающих систем определяются по (1). Схема на рис. 3 приводится к узлу 1, как показано на рис. 6.

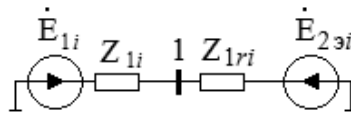


Рис. 6. Схема после приведения к узлу 1

Fig. 6. Circuit after reduction to node 1

Из этой схемы вытекают следующие уравнения:

$$\dot{E}_{1i} + \Delta\dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2i} = Z_{1\Sigma i}\dot{I}_{1i}, \quad (19)$$

где  $\dot{E}_{2i} = \frac{\dot{E}_{2i}}{D_{1ri}}$ ,  $Z_{1\Sigma i} = Z_{1i} + Z_{1ri}$ ,  $Z_{1ri} = \frac{B_{1ri}}{D_{1ri}}$ ;  $B_{1ri}$ ,  $D_{1ri}$  – коэффициенты четырехполюсника 1-г для  $i$ -й последовательности.

В итоге имеем следующие уравнения, приведенные к узлу 1:

$$\dot{I}_{1\text{норм}} + \frac{\Delta \dot{E}_1}{Z_{1\Sigma}} = \dot{I}_1, \quad (20)$$

$$\frac{\Delta \dot{E}_{12}}{Z_{1\Sigma 2}} = \dot{I}_{12}, \quad (21)$$

$$\frac{\Delta \dot{E}_{10}}{Z_{1\Sigma 0}} = \dot{I}_{10}, \quad (22)$$

где  $\dot{I}_{1\text{норм}} = \frac{1}{Z_{1\Sigma}} \left( \dot{E}_1 - \frac{\dot{E}_2}{D_{1r}} \right)$  – ток нормального режима в пункте 1.

Граничные условия в месте разрыва имеют вид

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_{12} + \dot{I}_{10} = 0, \quad \Delta \dot{U}_1 = \Delta \dot{U}_{12} = \Delta \dot{U}_{10}. \quad (23)$$

Сложив уравнения (20)–(22) и учитывая граничные условия (23), найдем

$$\dot{I}_{1\text{норм}} + \left( \frac{1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 0}} \right) \Delta \dot{E}_1 = 0. \quad (24)$$

Вычтя (20) из (24), получим

$$\left( \frac{1}{Z_{1\Sigma 2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 0}} \right) \Delta \dot{E}_1 = -\dot{I}_1. \quad (25)$$

Из (25) при  $\Delta \dot{U}_1 = -\Delta \dot{E}_1$  следует

$$\Delta Z_1 = \frac{\Delta \dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{Z_{1\Sigma 2} + Z_{1\Sigma 0}}{Z_{1\Sigma 2} Z_{1\Sigma 0}}. \quad (26)$$

Таким образом, разрыв в схеме прямой последовательности, на основе которой определяется угловая характеристика, заменяется дополнительным сопротивлением (26).

Аналогичные соотношения получаются для случая разрыва в конце линии:

$$\Delta Z_2 = \frac{\Delta \dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \frac{Z_{2\Sigma 2} + Z_{2\Sigma 0}}{Z_{2\Sigma 2} Z_{2\Sigma 0}}, \quad (27)$$

где  $Z_{2\Sigma i} = Z_{2i} + Z_{2si}$ ,  $Z_{2si} = \frac{B_{s2i}}{A_{s2i}}$ ;  $i = 2, 0$ ,  $B_{s2i}$ ,  $A_{s2i}$  – коэффициенты четырехполюсника s-2 для  $i$ -й последовательности.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

В табл. 1–4 приведены результаты сравнительных расчетов, показывающие погрешность упрощенного моделирования угловой характеристики в паузу ОАПВ с помощью одностороннего разрыва либо в начале линии, либо в ее конце. Расчеты проведены применительно к ВЛ 500 кВ [16]. Как следует из таблиц, упрощенный способ моделирования паузы ОАПВ может давать погрешность при определении максимума угловой характеристики, превышающую 5 %.

Таблица 1

Table 1

##### Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ

( $\ell = 350$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , степень компенсации 0 %)

##### Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time

( $\ell = 350$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , compensation degree 0 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	963,5	–
Разрыв в начале ВЛ	959	–0,5
Разрыв в конце ВЛ	985	2,2

Таблица 2

Table 2

##### Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ

( $\ell = 350$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , степень компенсации 97 %)

##### Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time

( $\ell = 350$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , compensation degree 97 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	1050	–
Разрыв в начале ВЛ	991	–5,6
Разрыв в конце ВЛ	992	–5,5

Таблица 3

Table 3

##### Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ

( $\ell = 700$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , степень компенсации 48 %)

##### Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time

( $\ell = 700$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , compensation degree 48 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	707,5	–
Разрыв в начале ВЛ	757,5	7,1
Разрыв в конце ВЛ	733	3,6



Таблица 4

Table 4

**Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ**  
 ( $\ell = 700$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , степень компенсации 97 %)

**Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time**  
 ( $\ell = 700$  км,  $Z_1 = Z_{12} = 90$  i,  $Z_{10} = 30$  i,  $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$ , compensation degree 97 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	722,5	–
Разрыв в начале ВЛ	719,5	–0,4
Разрыв в конце ВЛ	724,5	0,3

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен оригинальный точный алгоритм для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через ВЛ сверхвысокого напряжения, в паузу ОАПВ. Сравнение упрощенных способов моделирования паузы ОАПВ, когда двусторонний разрыв заменяется одним разрывом либо в начале, либо в конце линии, показало, что погрешность расчета угловых характеристик может превышать 5 %. Поэтому в общем случае следует придерживаться предложенного строгого способа моделирования паузы ОАПВ при определении угловой характеристики синхронного генератора, работающего на длинную линию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России: теоретические и практические основы. Т. 1. Электропередачи переменного тока / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорация «ЕЭЭК», 2012. – 696 с.
3. Веников В.А. Дальние электропередачи: специальные вопросы. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 312 с.
4. Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г. Способы ликвидации однофазных коротких замыканий в воздушных линиях сверхвысокого напряжения // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 116–130.
5. Шполянский О.Г. Параметры сближенных линий 750 кв. и характеристики их входного сопротивления в паузе однофазного автоматического повторного включения // Труды Института электродинамики НАН Украины. – 2015. – № 40. – С. 39–43.
6. Раишес В.С. Обобщение эксплуатационных данных эффективности ОАПВ ВЛ СВН и опытных данных времени гашения дуги подпитки // Электрические станции. – 1989. – № 3. – С. 65–72.
7. Альмендеева Е.В. Особенности выбора параметров срабатывания ОАПВ на примере МП терминала производства «ЭКРА» // Электроэнергетика глазами молодежи: труды 6 Международной молодежной научно-технической конференции, Иваново, 9–13 ноября 2015 г.: в 2 т. – Иваново, 2015. – Т. 1. – С. 39–42.

8. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993. – 560 с.
9. Барз И.Г., Эдельман В.И. Воздушные линии электропередачи: вопросы эксплуатации и надежности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
10. Перспективы применения ОАПВ в электропередаче 1150 кВ / Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес, М.Л. Левинштейн, М.И. Хорошев // Электропередачи 1150 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – Кн. 1. – С. 129–158.
11. Режимы дальних электропередач в примерах / Г.К. Зарудский, Е.В. Путятин, И.С. Рокотян и др.; под ред. Ю.П. Рыжова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 88 с.
12. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
13. Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г. Сравнительный анализ путей ликвидации неустойчивых однофазных коротких замыканий в нетранспонированных линиях СВН и УВН // Электричество. – 2017. – № 11. – С. 22–29.
14. Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г. Влияние длительности паузы ОАПВ на пропускную способность электропередачи по условию динамической устойчивости // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 2. – С. 163–176.
15. Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г. Влияние продолжительности паузы ОАПВ на пропускную способность электропередачи // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. – Чолпон-Ата, 2017. – Вып. 68: Исследование и обеспечение надежности систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2017. – С. 112–120.
16. Справочник по проектированию электроэнергетических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 290 с.

*Красильникова Татьяна Германовна*, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – транспорт электроэнергии на дальние расстояния, нетрадиционные способы передачи электроэнергии. Имеет более 50 публикаций. E-mail: [tatka552005@ya.ru](mailto:tatka552005@ya.ru)

*Самородов Герман Иванович*, доктор технических наук, профессор, научный руководитель отдела новых технологий филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СИБНИИЭ. Основное направление научных исследований – транспорт электроэнергии на дальние и сверхдальние расстояния, надежность электроэнергетических систем. Имеет около 100 публикаций, в том числе 3 монографии. E-mail: [german-samorodov@yandex.ru](mailto:german-samorodov@yandex.ru)

*Krasil'nikova Tatiana Germanovna*, D.Sc. (Eng.), professor at the department of automated power systems, NSTU. Her research interests are focused on electric power transportation over long distances and non-conventional ways of power transmission. She is the author of more than 50 publications. E-mail: [tatka552005@ya.ru](mailto:tatka552005@ya.ru)

*Samorodov German Ivanovich*, D.Sc. (Eng.), professor, research supervisor in the department of new technologies, branch of AO "NTS FSK" SIBRIPEE. The main field of his research is electric power transportation over long and very long distances and reliability of power systems. He is the author of over 100 publications including 3 monographs. E-mail: [german-samorodov@yandex.ru](mailto:german-samorodov@yandex.ru)

***Angular characteristic of a synchronous generator operating over a long line in the dead time of single-phase auto-reclosing\*****T. KRASIL'NIKOVA<sup>1,a</sup>, G. SAMORODOV<sup>2,b</sup>*<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*<sup>2</sup> *Siberian Research Institute of Power Engineering, 10/1, Klenovaya St., Novosibirsk, 630126, Russian Federation*<sup>a</sup> *tatka552005@ya.ru*    <sup>b</sup> *german-samorodov@ya.ru***Abstract**

This article discusses the problem of calculating an angular characteristic of a synchronous generator related to the elimination of arcing single phase-to-ground faults in the lines of ultrahigh voltage (UHV). Due to a long length of UHV lines such accidents cause the vast majority of them (98 %). At the same time, a significant part (70 %) of single phase-to-ground faults (SPGF) represents unstable arc accidents, which can be successfully eliminated in the single-phase automatic reclosing (SPAR) cycle. The SPAR dead time depends on the value of the secondary arc currents and is in the range of 0.5...3.0 s. Therefore, it is of interest to analyze the nature of dynamic transitions when using SPAR of different duration and to assess the capacity level of very long power transmission lines in terms of dynamic stability. The features of dynamic transition in determining the accident can be traced using angular characteristics of the normal, SPGF and SPAR modes. However, in the literature there is no exact way to simulate the angular characteristic in the dead time, when the emergency phase is disconnected on both sides at the ends of the line. The article proposes an original exact algorithm for calculating an angular characteristic of a synchronous generator operating over the UHV line in the dead time, in order to estimate an error of simplified modeling of the angular characteristic, when the two-way phase opening is replaced by a single gap either at the beginning or at the end of the line.

**Keywords:** arcing single phase-to-ground fault, single-phase auto-reclosing, transient stability, power-angle curve, synchronous generator, UHV line, opening of a phase, symmetrical component method, calculation error

**REFERENCES**

1. Levinshtein M.L., ed. *Protsessy pri odnofaznom avtomaticheskoy povtornom vklyuchenii linii vysokikh napryazhenii* [The processes of high voltage lines at single-phase auto-reclosing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p.
2. D'yakov A.F., ed. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii: teoreticheskie i prakticheskie osnovy. T 1. Elektroperedachi peremennogo toka* [The electric networks of super- and ultra-high voltage UES of Russia. Theoretical and practical foundations. Vol. 1]. Moscow, NTF "Energoprogress" Corporation "EEEE" Publ., 2012. 696 p.
3. Venikov V.A. *Dal'nie elektroperedachi: spetsial'nye voprosy* [Long-distance transmission]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 312 p.
4. Krasil'nikova T.G., Dzhononayev S.G. *Sposoby likvidatsii odnofaznykh korotkikh замыканий v vozdukhnykh liniyakh sverkhvysokogo napryazheniya* [The methods of liquidation single-phase short circuit in the aerial lines of extra-high voltage]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo*

---

\* Received 20 December 2018.

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 116–130.

5. Shpolianskii O.G. Parametry sblizhennykh linii 750 kv. i kharakteristiki ikh vkhodnogo so-protivleniya v pauze odnofaznogo avtomaticheskogo povtornogo vklyucheniya [Parameters of 750 kV coupled overhead transmission lines and characteristics of their input impedance during the pause of one phase automated repeated switching]. *Trudy Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2015, no. 40, pp. 39–43.

6. Rashkes V.S. Obobshchenie ekspluatatsionnykh dannykh effektivnosti OAPV VL SVN i opytnykh dannykh vremeni gasheniya dugi podpitki [Generalisation of operational data of efficiency SPAR on EHV lines and experimental data of time of secondary arc extinction]. *Elektricheskie stantsii – Power Technology and Engineering*, 1989, no. 3, pp. 65–72. (In Russian).

7. Al'mendeveva E.V. [The features choice of parameters response Single-Phase Auto-Reclosing for example of the MP terminal production "EKRA"]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy 6 mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: v 2 t.* [The electric power industry through the impression of youth: the proceedings of the 6 international scientific-technical conference: in 2 vol.], Ivanovo, 9–13 November 2015, vol. 1, pp. 39–42. (In Russian).

8. Aleksandrov G.N., ed. *Proektirovanie linii elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya* [The design of superhigh voltage transmission lines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1993. 560 p.

9. Barg I.G., Edel'man V.I. *Vozdushnye linii elektropredachi: voprosy ekspluatatsii i nadezhnosti* [The overhead transmission lines: Issues of operation and reliability]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.

10. Belyakov N.N., Rashkes V.S., Levinshtein M.L., Khoroshev M.I. Perspektivy primeneniya OAPV v elektropredache 1150 kV [The prospects of application of the Single-Phase Auto-Reclosing in power transmission 1150 kV]. *Elektropredachi 1150 kV* [1150 kV transmission]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, bk. 1, pp. 129–158.

11. Ryzhov Yu.P., ed. *Rezhimy dal'nikh elektropredach v primerakh* [The modes of longdistance transmission in the examples]. Moscow, MPEI Publ., 1994. 88 p.

12. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [The transient electromechanical processes in electrical systems]. 4th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.

13. Krasil'nikova T.G., Dzhononaevev S.G. Sravnitel'nyi analiz putei likvidatsii neustoichivyykh odnofaznykh korotkikh zamykanii v netransponirovannykh liniyakh SVN i UVN [Comparative analysis of ways to eliminate unstable single-phase short circuits in non-transposed lines of EHV and UHV]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2017, no. 11, pp. 22–29.

14. Krasil'nikova T.G., Dzhononaevev S.G. Vliyanie dlitel'nosti pauzy OAPV na propusknyuyu sposobnost' elektropredachi po usloviyu dinamicheskoi ustoichivosti [The effect of single-phase auto-reclosing pause duration on the power transmission throughput under dynamic stability]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 2 (67), pp. 163–176.

15. Krasil'nikova T.G., Dzhononaevev S.G. Vliyanie prodolzhitel'nosti pauzy OAPV na propusknyuyu sposobnost' elektropredachi [Influence of the duration of the SPAR pause on transmission capacity transmission line]. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki*. Vyp. 68. *Issledovanie i obespechenie nadezhnosti sistem energetiki* [Methodological issues of reliability research for large energy systems. Iss. 68. Research and ensuring the reliability of energy systems]. Cholpon-Ata, 2017, pp. 112–120.

16. Faibisovich D.L., ed. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh setei* [Guide to the design of electric power networks]. Moscow, NC ENAS Publ., 2006. 290 p.

Для цитирования:

Красильникова Т.Г., Самородов Г.И. Угловая характеристика синхронного генератора, работающего через длинную линию, в паузу ОАПВ // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 141–153. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-141-153.

For citation:

Krasil'nikova T.G., Samorodov G.I. Uglovaya kharakteristika sinkhronnogo generatora, rabotayushchego cherez dlinnuyu liniyu, v pauzu OAPV [Angular characteristic of the synchronous generator operating through a long line in the dead time of single-phase auto-reclosing]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 141–153. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-141-153.