

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.14.02)

УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17

Учет несинфазности генераторов при расчетах токов в начальный момент короткого замыкания

Ю.П. Гусев, А.Г. Каюмов, В.В. Говорин

В настоящее время расчет токов короткого замыкания в электроэнергетических системах выполняется в соответствии с национальными стандартами, использующими ряд допущений, одним из которых является пренебрежение несинфазностью синхронных генераторов в режиме, предшествующем короткому замыканию. Из-за обострения проблемы обеспечения соответствия, установленного в электроэнергетических системах электрооборудования непрерывно возрастающему уровню токов короткого замыкания, ужесточаются требования к точности их расчета.

Для оценки влияния несинфазности генераторов на ток короткого замыкания и решения вопроса о целесообразности внесения изменений в регламентируемую стандартами методику расчета токов короткого замыкания проведено исследование влияния несинфазности синхронных генераторов с учетом параметров режима, предшествующего короткому замыканию, на ток в начальный момент короткого замыкания. Для анализа влияния несинфазности разработана математическая модель. Вариантные расчеты сделаны с помощью Mathcad. Исследование выполняли для синхронного генератора, работающего параллельно с электроэнергетической системой, варьировали факторы, отражающие особенности конструкции синхронных генераторов, их мощность в режиме, предшествующем короткому замыканию, электрическую удаленность синхронного генератора от электроэнергетической системы. В качестве исходных данных использованы параметры электрооборудования, установленного в электроэнергетической системе Республики Таджикистан.

Получена оценка влияния статической несинфазности синхронных генераторов на значение периодической составляющей тока короткого замыкания. Показано, что неучёт несинфазности синхронных генераторов приводит к завышению значений токов короткого замыкания, рассчитанных по методам, соответствующим действующим стандартам, погрешность расчетов может достигать 14%. Рекомендовано учитывать статическую несинфазность синхронных генераторов при решении задач координации уровней токов короткого замыкания и для совершенствования методов расчета токов короткого замыкания в энергосистемах. Несинфазность синхронных генераторов должна быть принята во внимание при обосновании необходимости замены электрооборудования электростанций и подстанций в связи с ростом уровней токов короткого замыкания.

Ключевые слова: метод расчета токов короткого замыкания, статическая несинфазность синхронных генераторов, координация уровней токов короткого замыкания, электроэнергетическая система.

Для цитирования: Гусев Ю.П., Каюмов А.Г., Говорин В.В. Учет несинфазности генераторов при расчетах токов в начальный момент короткого замыкания // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 11—17. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.

Consideration of the Out-of-Phase Operating Conditions of Generators in the Power System in Calculating the Currents at the Short-Circuit Fault Initial Moment

Yu.P. Gusev, A.G. Kayumov, V.V. Govorin

At present, short-circuit fault currents in electric power systems are calculated in accordance with national standards, which use a number of assumptions. One of these assumptions is neglecting possible out-of-phase operation of synchronous generators in the mode preceding

the short-circuit fault. At present, the constantly growing level of short-circuit currents is a factor aggravating the problem of ensuring consistency between the equipment installed in the electric power systems and these currents. Accordingly, more stringent requirements are posed to the accuracy of short-circuit fault analysis methods.

The aim of this work is to estimate the effect the out-of-phase operating conditions of synchronous generators have on the short-circuit current and to decide whether it is advisable to introduce changes in the short-circuit current calculation procedure stipulated by the relevant standards. To this end, the effect the out-of-phase operating conditions of synchronous generators have on the current at the initial moment of a short-circuit fault is studied taking into account the parameters of the mode preceding the short-circuit fault. To analyze the influence of out-of-phase operating conditions of the generators on the short-circuit fault currents, a mathematical model was developed, and case calculations were carried out using the Mathcad software package. The study was carried out for a synchronous generator operating in parallel with the electric power system; in so doing, factors reflecting the design features of the synchronous generators, their power in the mode preceding the short-circuit fault, and the electrical remoteness of the synchronous generator from the grid were varied. The parameters of the electrical equipment installed in the electric power system of the Republic of Tajikistan were used as initial data.

The effect the static out-of-phase operating conditions of synchronous generators have on the short-circuit current periodic component value has been evaluated. It is shown that calculations of short-circuit currents carried out according to the methods stipulated by the standards that are currently in force, in which out-of-phase operation of synchronous generators is not taken into account, yield overestimated short-circuit current values, and the calculation error can be as much as 14%. It has been recommended to take into account the static out-of-phase operating conditions of synchronous generators in solving matters concerned with coordination of short-circuit current levels, and to improve the methods for calculating short-circuit currents in power systems. The out-of-phase operation of synchronous generators must be taken into account in substantiating the need of replacing the electrical equipment of power plants and substations in view of growing levels of short-circuit currents.

Key words: short circuit current analysis method, static out-of-phase operation of synchronous generators, coordination of short-circuit current levels, electric power system.

For citation: Gusev Yu.P., Kayumov A.G., Govorin V.V Consideration of the Out-of-Phase Operating Conditions of Generators in the Power System in Calculating the Currents at the Short-Circuit Fault Initial Moment. Bulletin of MPEI. 2019;4:11—17. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.

Введение

Причина большинства аварий в электроэнергетической системе (ЭЭС) — короткие замыкания (КЗ). Для расчетов КЗ с учетом всех влияющих факторов и особенностей различных элементов систем требуются современные компьютерные программные комплексы. Методика расчетов регламентирована действующими стандартами, в которых все элементы энергосистемы представлены в виде источника электродвижущей силы (ЭДС) и комплексных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей [1 — 3]. Стандартная методика расчета токов КЗ базируется на ряде допущений, уменьшающих трудоемкость расчетов. Несмотря на то, что большое количество публикаций посвящено проблеме расчета токов КЗ [4 — 6], до сих пор все проблемы остаются актуальными, а в последнее время (с развитием ЭЭС) концентрация узлов генерации и нагрузки увеличиваются, и уровень токов КЗ, соответственно, непрерывно растет. Из-за роста токов КЗ с каждым годом к электрооборудованию ЭЭС предъявляют все более жесткие требования, особенно к коммутационным аппаратам, снижают запасы отключающей способности при выборах высоковольтных выключателей, что обуславливает повышение требований и к точности расчета токов КЗ [7].

Исследовано влияние статической несинфазности СГ на токи трехфазного КЗ, как наиболее тяжелого вида аварий. В действующих стандартах несинфазностью синхронного генератора (СГ) можно пренебречь, поскольку считается, что все СГ в ЭЭС в момент, предшествующий КЗ, работают синхронно и синфазно. Суммирование токов КЗ, поступающих от отдельных

источников к месту повреждения, в нормативных документах дано в скалярных величинах, что соответствует совпадению по фазе всех ЭДС генераторов. В действительности СГ работают со сдвигом фаз друг относительно друга. Для исключения этой методической погрешности токи КЗ, поступающие от генераторов к месту повреждения, должны складываться векторно, с учетом разницы начальных фаз.

Оценка влияния несинфазности СГ на суммарные токи КЗ в месте повреждения представлена на основе анализа влияния параметров, характеризующих установившийся режим, предшествующий КЗ, поэтому вызванная этим режимом несинфазность названа статической. Кроме статической несинфазности СГ существует и динамическая несинфазность, проявляющаяся при увеличении угла мощности СГ относительно эквивалентной ЭЭС в процессе КЗ. Динамическая несинфазность обусловлена разбалансировкой электромагнитного момента СГ и момента первичного двигателя — турбины. Статическая несинфазность проявляется в начальный момент КЗ, а динамическая — после возникновения КЗ.

Цель настоящей работы — оценка погрешностей расчета токов КЗ, полученных в результате пренебрежения статической несинфазностью СГ в зависимости от факторов, отражающих конструкцию СГ, режима, предшествующего КЗ, и электрической удаленности СГ от ЭЭС. Для достижения цели разработана математическая модель и выполнены расчеты для простейшей ЭЭС с генератором, присоединенным к шинам бесконечной мощности через трансформатор и линию электропередачи (рис. 1). Расчетная схема содержит один

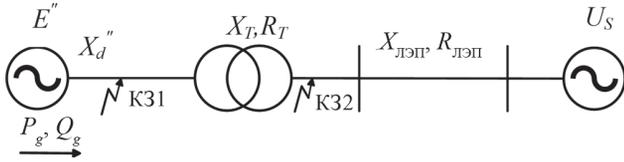


Рис. 1. Расчетная схема ЭЭС

из генераторов энергосистемы и балансирующий узел, замещающий все остальные генераторы. Электрическая удаленность генератора от других генераторов ЭЭС варьируется с помощью изменения длины линии электропередачи. Несинфазность оценивается через разность фаз ЭДС выделенного генератора и ЭДС эквивалентного источника, замещающего остальные генераторы ЭЭС. В частном случае генераторы всех блоков исследуемой электростанции, кроме выделенного генератора, относятся к эквивалентному источнику. При разработке расчетной математической модели предполагалось, что в установившемся режиме и в начальный момент КЗ возбуждение СГ и частота вращения ротора не меняются и остаются постоянными.

Предшествующий КЗ режим варьировали по значениям активной P_g и реактивной Q_g мощностей СГ в относительных единицах. Напряжение балансирующего узла ЭЭС принимали неизменным, $U_s = 1$ о. е.

С учетом принятых расчетных условий ЭДС СГ в установившемся режиме в комплексных значениях равно:

$$\begin{aligned} \dot{E}_Q = \dot{U}_s + \frac{P_g(R_g + R_\Sigma) + Q_g(X_d + X_\Sigma)}{\dot{U}_s} + \\ + j \frac{P_g(X_d + X_\Sigma) - Q_g(R_g + R_\Sigma)}{\dot{U}_s}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_\Sigma = R_g + R_{ЛЭП}$, $X_\Sigma = X_g + X_{ЛЭП}$ — эквивалентные активное и индуктивное сопротивления трансформатора и линии электропередачи.

Используя (1), можно вычислить угол между векторами ЭДС СГ и напряжения на шинах балансирующего узла ЭЭС:

$$\delta = \arg(\dot{E}_Q). \quad (2)$$

Ток $\dot{I}_{|0|}$ СГ в режиме, предшествующем КЗ, выглядит как

$$\dot{I}_{|0|} = \frac{\dot{E}_Q - U_s e^{-j\delta}}{(R_g + R_T + R_{ЛЭП}) + j(X_d + X_T + X_{ЛЭП})}. \quad (3)$$

Угол сдвига фаз между векторами напряжения и тока генератора равен:

$$\varphi = \arg(\dot{U}_s) - \arg(\dot{I}_{|0|}). \quad (4)$$

В соответствии с (1) — (4) построена векторная диаграмма СГ на комплексной плоскости со следующими условными направлениями и знаками [8]:

- положительные вещественные величины комплексной плоскости совмещены с осью q ротора, ось мнимых величин $+j$ с осью d , направление углов — против движения часовой стрелки.

- ось d опережает ось q на 90° ;
- при совпадении направления компонентов векторов с направлениями соответствующих осей их значения считаются положительными;
- продольные и поперечные составляющие всех величин обозначаются индексами соответствующих осей.

Векторная диаграмма СГ в режиме, предшествующем КЗ, начата с построения векторов $\dot{I}_{|0|}$ и \dot{U}_s по заданным значениям активной ($P_g > 0$) и реактивной ($Q_g > 0$) мощностей. В соответствии с уравнением Парка–Горва [9] выражение для напряжений ЭЭС по осям d и q можно записать в комплексной плоскости:

$$\begin{cases} U_{ds} = U_s \sin(\delta); \\ U_{qs} = U_s \cos(\delta). \end{cases} \quad (5)$$

Таким же образом определяются проекция векторов тока СГ в установившемся режиме в d и q координатах

$$\begin{cases} I_{d|0|} = I_{|0|} \sin(\delta + \varphi); \\ I_{q|0|} = I_{|0|} \cos(\delta + \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

и вектор синхронной ЭДС СГ [9]:

$$\dot{E}_q = \dot{E}_Q + j(X_d - X_q) \dot{I}_{d|0|}. \quad (7)$$

На рисунке 2 изображена соответствующая формулам (1) — (7) векторная диаграмма СГ для режима, предшествующего КЗ. Диаграмма построена для СГ с демферными обмотками по продольной и поперечной осям ротора (помимо обмотки возбуждения по оси d). Все векторы вращаются вместе с ротором с угловой скоростью ω против часовой стрелки.

В начальный момент КЗ следует учитывать сверхпереходную ЭДС не только по поперечной E_q'' , но и по продольной E_d'' осям. Это связано с появлением тока в обмотке продольного демферного контура. Сверхпереходные ЭДС находят по данным предшествующего режима КЗ:

$$\begin{cases} \dot{E}_{d0}'' = \dot{U}_{ds} + jX_q'' \dot{I}_{q|0|} + R_g \dot{I}_{d|0|}; \\ \dot{E}_{q0}'' = \dot{U}_{qs} + jX_d'' \dot{I}_{d|0|} + R_g \dot{I}_{q|0|}. \end{cases}$$

Из векторной диаграммы СГ (рис. 2) в начальной момент КЗ вычислена сверхпереходная ЭДС:

$$E'' = \sqrt{(E_{d0}'')^2 + (E_{q0}'')^2}.$$

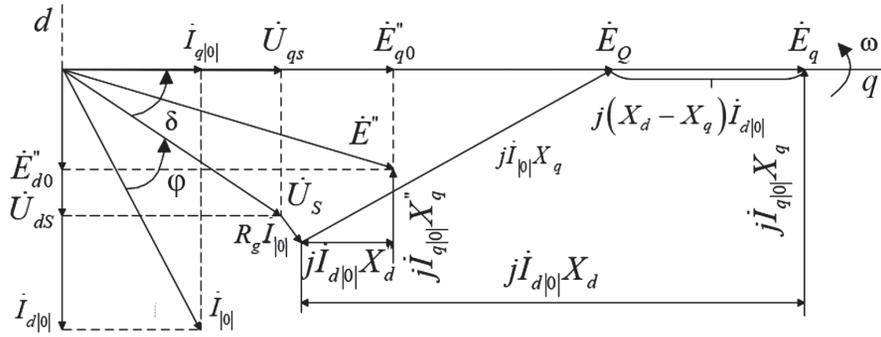


Рис. 2. Векторная диаграмма СГ в режиме, предшествующем КЗ

Начальные значения периодической составляющей установлены с учетом несимметрии роторов в комплексных значениях в продольной и поперечной осях:

$$\begin{cases} \dot{I}_{d0}'' = \dot{E}_{q0}'' / \left[(R_g + R_\Sigma) + j(X_d'' + X_\Sigma) \right]; \\ \dot{I}_{q0}'' = \dot{E}_{d0}'' / \left[(R_g + R_\Sigma) + j(X_q'' + X_\Sigma) \right]. \end{cases}$$

Следовательно, суммарные начальные значения периодической составляющей тока КЗ, приходящего от СГ и от ЭЭС к месту повреждения, равны:

$$\begin{cases} I_{go} = \sqrt{(I_{d0}'')^2 + (I_{q0}'')^2}; \\ I_s = U_s / (jX_\Sigma + R_\Sigma). \end{cases}$$

Для определения интервалов варьирования параметров исследуемой ЭЭС от ОАО «Барки Точик» получены технические параметры электрооборудования ЭЭС Таджикистана (таблица). Для анализа влияния на несинфазность СГ их конструктивных особенностей использованы параметры СГ, серий СВ-1260/855/235-32 (Г2) и

Технические параметры электрооборудования

Наименование	Параметры		
	G1	G2	G3
Синхронный гидрогенератор			
Номинальная мощность S_g , МВА	176,5	176,5	176,5
Номинальное напряжение U_g , кВ	15,75	15,75	15,75
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,85	0,85	0,850
Активное сопротивление обмотки якоря R_g , о.е.	0,0023	0,0031	0,0034
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси X_d , о.е.	1,00	1,01	1,03
Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси X_q , о.е.	0,654	0,66	0,67
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси X_d' , о.е.	0,28	0,33	0,35
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси X_d'' , о.е.	0,17	0,24	0,25
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси X_q'' , о.е.	0,184	0,25	0,27
Силовой трансформатор			
Номинальная мощность S_T , МВА	200		
Номинальное напряжение U_{T1}/U_{T2} , кВ	230/15,75		
Активное сопротивление R_T , о.е.	0,00293		
Индуктивное сопротивление X_T , о.е.	0,11996		
Группа соединения обмоток	$Y_0/\Delta - 11$		
Линии электропередачи			
Активное погонное сопротивление $R_{\text{вд}}$, Ом/км	0,075		
Индуктивное погонное сопротивление $X_{\text{вд}}$, Ом/км	0,420		
Электроэнергетическая система			
Напряжение системы U_s , кВ	230		

СВ-1260/185-60УХЛ4 (ГЗ) [10]. В качестве индикатора, отражающего особенности конструкции СГ, взяты параметры их сверхпереходных сопротивлений X_d'' .

На рисунке 3 изображены погрешности расчетных значений токов КЗ, вычисленных по [2], полученные при варьировании активной мощности СГ в режиме P_0 , предшествующем КЗ, определяемые по следующей формуле:

$$\Delta I_{КЗ} = \frac{I_{г0ГОСТ} + I_{сГОСТ} - |i_{г0} + i_s|}{|i_{г0} + i_s|} 100\%,$$

где: $I_{г0ГОСТ}, I_{сГОСТ}$ — токи КЗ от СГ и ЭЭС, рассчитанные по [2].

Из рисунка 3 следует, что погрешность расчета токов КЗ для большой области варьируемых параметров превышает 5% и может достигать 14%.

На рисунке 4 приведены зависимости погрешностей от длины линии электропередачи (ЛЭП), характеризующей электрическую удаленность СГ от ба-

лансирующего узла ЭЭС L , установленной с учетом пропускной способности ЛЭП [11, 12]. Минимальная длина ЛЭП, соответствующая минимальной электрической удаленности, равна 5 км, а максимальная длина ЛЭП, соответствующая максимальной электрической удаленности, — 150 км. Минимальной длине ЛЭП соответствует максимальное значение тока КЗ от системы, существенно превышающее значение тока КЗ от СГ, и минимальная несинфазность генераторов. При увеличении электрической удаленности СГ от ЭЭС ток КЗ от ЭЭС уменьшается, а несинфазность генераторов увеличивается.

Для оценки влияния на погрешность конструктивных особенностей СГ выполнены расчеты при разных значениях сверхпереходных индуктивных сопротивлений X_d'' , результаты представлены на рис. 5.

Заключение

Разработана математическая модель, учитывающая статическую несинфазность СГ, а также факторы, влияющие на результаты расчета токов в начальный момент КЗ.

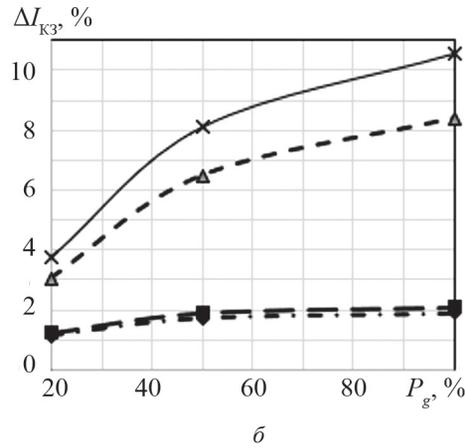
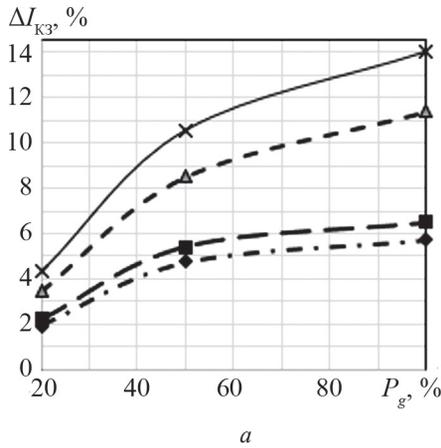


Рис. 3. Погрешности токов КЗ, рассчитанных по [2], при варьировании активной мощности СГ в режиме P_0 , предшествующем КЗ: а — при КЗ на выводах СГ; б — при КЗ за повышающим трансформатором; ◆ — $X_{dmin}'' L_{min}$; Δ — $X_{dmin}'' L_{max}$; × — $X_{dmax}'' L_{max}$; ■ — $X_{dmax}'' L_{min}$

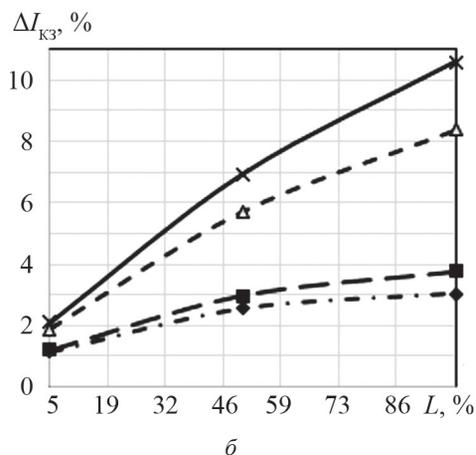
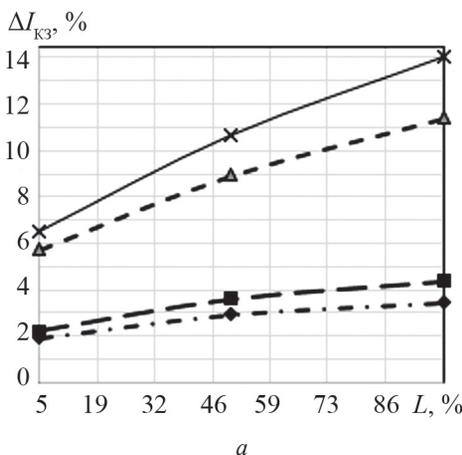


Рис. 4. Погрешности токов КЗ, рассчитанных по [2], при варьировании электрической удаленности L длины ЛЭП: а — на выводе СГ; б — за повышающим трансформатором; ◆ — $X_{dmin}'' P_{gmin}$; Δ — $X_{dmin}'' P_{gmax}$; × — $X_{dmax}'' P_{gmax}$; ■ — $X_{dmax}'' P_{gmin}$

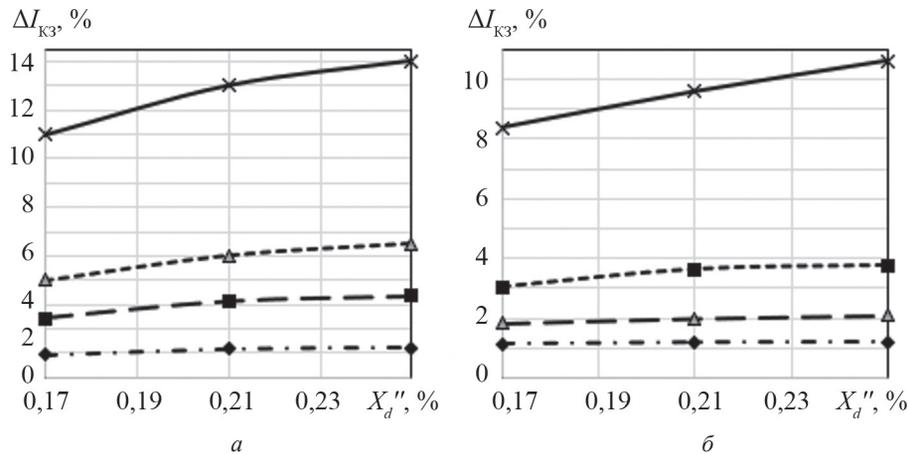


Рис. 5. Погрешности токов КЗ, рассчитанных по [2], при варьировании X_d'' СГ:

a — на выводе СГ; b — за повышающим трансформатором; \blacklozenge — $L_{\min}^P P_{g\min}$; \triangle — $L_{\min}^P P_{g\max}$; \times — $L_{\max}^P P_{g\max}$; \blacksquare — $L_{\max}^P P_{g\min}$

Показано, что погрешности расчета токов КЗ, в зависимости от мощности СГ в режиме, предшествующем КЗ, от особенностей конструкции СГ и электрической удаленности СГ могут достигать 14%, что отражается на результатах проверки соответствия электрооборудования токам КЗ и помогает избежать завышенных требований по электродинамической стойкости.

Результаты выполненных исследований позволяют избежать избыточных запасов также и по отключающей способности выключателей за счет снижения расчетных значений тока на протяжении всего КЗ. Они могут быть дополнены и уточнены путем учета влияния динамической несинфазности СГ на ток КЗ.

Литература

1. IEC 60909-0—2016. Short-circuit Currents in Three Phases A.C. Systems.
2. ГОСТ Р 52735—2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
3. Papadopoulos T.A. e.a. Static and Dynamic Calculation of Short-circuit Currents in Synchronous Generators // Proc. Intern. Conf. Power Syst. Trans. Delft, 2011. Pp. 1—7.
4. Глебов И.А., Харламова Е.Ф. Методика обработки опытных данных внезапного трехфазного короткого замыкания гидрогенератора // Известия РАН. Серия «Энергетика». 1999. № 3. С. 153—157.
5. Савина Н.В. и др. Учет нелинейных нагрузок при расчете коротких замыканий // Вестник Амурского гос. ун-та. Серия «Естественные и экономические науки». 2014. Вып. 65. С. 63—72.
6. Wang L. e. a. Methods of Interfacing Rotating Machine Models in Transient Simulation Programs // IEEE Trans. Power Delivery. 2010. V. 25. Iss. 2. Pp. 891—903.
7. Qiantu R. Present Situation of Short Circuit Current Control in Shanghai Power Grid and Countermeasures // Power Syst. Techn. 2005. V. 29 (2). Pp. 78—83.
8. Мамиконянц Л.Г. Анализ некоторых аспектов переходных и асинхронных режимов синхронных и асинхронных машин / под ред. Ю.Г. Шакаряна. М.: ЭЛКС-КМ, 2006.

References

1. IEC 60909-0—2016. Short-circuit Currents in Three Phases A.S. Systems.
2. GOST R 52735—2007. Korotkie Zamykaniya v Elektroustanovkakh. Metody Rascheta v Elektroustanovkakh Peremennogo Toka Napryazheniem Svyshe 1 kV. (in Russian).
3. Papadopoulos T.A. e.a. Static and Dynamic Calculation of Short-circuit Currents in Synchronous Generators. Proc. Intern. Conf. Power Syst. Trans. Delft, 2011:1—7.
4. Glebov I.A., Kharlamova E.F. Metodika Obrabotki Opytnykh Danykh Vnezapnogo Trekhfaznogo Korotkogo Zamykaniya Gidrogenatora. Izvestiya RAN. Seriya «Energetika». 1999;3:153—157. (in Russian).
5. Savina N.V. i dr. Uchet Nelineynykh Nagruzok pri Raschete Korotkikh Zamykaniy. Vestnik Amurskogo Gos. Un-ta. Seriya «Estestvennye i Ekonomicheskie Nauki». 2014;65:63—72. (in Russian).
6. Wang L. e. a. Methods of Interfacing Rotating Machine Models in Transient Simulation Programs. IEEE Trans. Power Delivery. 2010;25;2:891—903.
7. Qiantu R. Present Situation of Short Circuit Current Control in Shanghai Power Grid and Countermeasures. Power Syst. Techn. 2005;29 (2):78—83.
8. Mamikonyants L.G. Analiz Nekotorykh Aspektov Perekhodnykh i Asinkhronnykh Rezhimov Sinkhronnykh i Asinkhronnykh Mashin. Pod Red. Yu.G. Shakaryana. M.: ELKS-KM, 2006.

9. **Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев Ю.П., Пиратов М.В.** Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: Изд-во МЭИ, 2008.

10. **Неклепаев Б.Н., Крючков И.П.** Электрическая часть электростанции. СПб.: БЧВ-Петербург, 2013.

11. **Колчанова В.А., Колчанова В.А., Исаев Ю.Н., Лопатин В.В.** Математические модели синхронного генератора при различных пространственных удалениях точки возмущения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2 [Электрон. ресурс] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12293> (дата обращения 11.01.2019).

12. **Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М.** Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС, 2012.

9. **Kryuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Yu.P., Piratov M.V.** Perekhodnye Protsessy v Elektroenergeticheskikh Sistemakh. M.: Izd-vo MEI, 2008. (in Russian).

10. **Neklepaev B.N., Kryuchkov I.P.** Elektricheskaya Chast' Elektrostantsii. SPb.: BCHV-Peterburg, 2013. (in Russian).

11. **Kolchanova V.A., Kolchanova V.A., Isaev Yu.N., Lopatin V.V.** Matematicheskie Modeli Sinkhronnogo Generatora pri Razlichnykh Prostranstvennykh Udaleniyakh Tochki Vozmushcheniya. Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya. 2014;2 [Elektron. Resurs] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12293> (Data Obrashcheniya 11.01.2019). (in Russian).

12. **Karapetyan I.G., Faybisovich D.L., Shapiro I.M.** Spravochnik po Proektirovaniyu Elektricheskikh Setey. Pod Red. D.L. Faybisovicha. M.: ENAS, 2012. (in Russian).

Сведения об авторах:

Гусев Юрий Павлович — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: GusevYP@mail.ru

Каюмов Алишер Гафурджонович — аспирант кафедры электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: Kayumov_AG@mail.ru

Говорин Виталий Вадимович — магистрант кафедры электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: govorirk@gmail.com

Information about authors:

Gusev Yuriy P. — Ph.D. (Techn.), Professor, Head of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: GusevYP@mail.ru

Kayumov Alisher G. — Ph.D.-student of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: Kayumov_AG@mail.ru

Govorin Vitaliy V. — Undergraduate of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: govorirk@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 11.03.2019

The article received to the editor: 11.03.2019