

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
НА ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРИ ВНЕШНЕМ СИММЕТРИЧНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ****ANALYSIS OF OVERVOLTAGE POSSIBILITY ON THE EXCITATION WINDING
OF A SYNCHRONOUS GENERATOR OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM
IN CASE OF EXTERNAL SYMMETRICAL SHORT CIRCUIT**

Ключевые слова: автономные системы электроснабжения, обмотка возбуждения синхронного генератора, перенапряжения.

Надежное обеспечение потребителей электрической энергией не в последнюю меру зависит от надежности функционирования источников этой энергии, в данном рассмотрении – синхронных генераторов, работающих в автономных системах электроснабжения. В отличие от генераторов электрических станций, входящих в состав энергосистем и отделенных от нагрузок достаточно большими сопротивлениями, системы электроснабжения с автономными генераторами, напротив, отличаются достаточно малыми сопротивлениями связи. Резкие изменения параметров питаемой нагрузки, собственные переходные и аварийные режимы, например, короткие замыкания на клеммах генератора, форсировка возбуждения и т.д. могут привести к различным отказам в работе синхронного генератора. В данной статье рассматривается вероятность возникновения перенапряжений в системе вентильного возбуждения синхронного генератора при внешних трехфазных коротких замыканиях. На основе аналитических выражений, описывающих физические процессы, происходящие в системе возбуждения синхронных ге-

нераторов, выявлены условия возникновения перенапряжений.

Keywords: autonomous power supply systems, excitation winding of synchronous generator, overvoltage.

Reliable supply of consumers with electric energy largely depends on the reliability of power source functioning. In the context of this paper it depends on synchronous generators operating in autonomous power supply systems. In contrast to the power plant generators which are part of power systems and are protected from the loads by sufficiently large resistances, power supply systems with autonomous generators are characterized by rather low resistances. Abrupt changes in the supply load parameters, their own transient and emergency modes, for example, short circuits at the generator terminals, forcing excitation, etc. may lead to various failures in the synchronous generator operation. This paper discusses the possibility of overvoltage in the valve excitation system of a synchronous generator with external three-phase short circuits. On the basis of analytical expressions describing the physical processes occurring in the excitation system of synchronous generators, the conditions for the occurrence of overvoltages are identified.

Бельий Владимир Борисович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: vladimir-belyi@inbox.ru.

Belyi Vladimir Borisovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: vladimir-belyi@inbox.ru.

Введение

Обеспечение требуемой надежности систем электроснабжения представляет собой достаточно сложную задачу, правильное решение которой требует учета многих факторов. К таким факторам необходимо отнести возможность возникновения различных аварийных режимов в системе. Актуальность выявления факторов, влияющих на надежность функционирования систем электроснабжения, объясняется, в первую очередь, возможностью их предотвращения или минимизацией негативных послед-

ствий. Исследование подобных режимов удобнее, а порою только возможно, вести с помощью аналогового или математического моделирования. Поэтому крайне желательно создать математическую модель, способную корректно описывать не только нормальные рабочие режимы, но и возможные аварийные.

Цель и задачи исследования: на основе аналитических выражений для тока возбуждения в конкретных переходных режимах произвести анализ условий возникновения перенапряжений.

Объекты и методы

Объектом исследования данной работы является автономная система электроснабжения с источником электрической энергии в виде синхронного генератора с вентильным возбуждением. Предмет исследования – переходные процессы в автономных системах электроснабжения, в частности, внешние симметричные короткие замыкания. Метод исследования – математическое моделирование.

Экспериментальная часть

В работе использованы экспериментальные материалы [1], позволяющие всесторонне оценить качество используемой математической модели.

Результаты исследований и их обсуждение

Оценивать условия возникновения перенапряжений будем по знаку тока возбуждения. Его переход через ноль приводит к запираению элементов вентильного преобразователя [2], что вызывает появление дополнительной ЭДС в обмотке возбуждения, которая без принятия ограничивающих мер при идеальных вентилях теоретически может быть бесконечно большой.

Если принять во внимание обычные допущения линейной теории [3] при трехфазном коротком замыкании синхронной машины без демпферной обмотки для тока возбуждения, можно записать выражение вида [4]

$$\frac{i_f}{i_{f0}} = 1 + \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \cdot \frac{u}{e} \cos \theta_0 \varepsilon^{\frac{-\tau}{T_d}} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \cdot \frac{u}{e} \cos(\tau + \theta_0) \varepsilon^{\frac{-\tau}{T'_d}}, \quad (1)$$

где i_{f0} – начальное значение тока возбуждения;

T_a, T'_d – постоянные времени затухания апериодических токов в обмотках якоря и возбуждения, рад.

Согласно формуле (1), при пренебрежении затуханием вынужденных составляющих тока возбуждения ($T'_d \rightarrow \infty, T_a \rightarrow \infty$) независимо

$$\frac{x_d - x'_d}{x'_d} \cdot \frac{e}{u} \leq [\cos \theta_0]^{\frac{T'_d T_a}{T'_d T_a - 1}} \left[\frac{T_a}{T'_d} \right]^{\frac{1}{T'_d T_a - 1}} \left[\frac{T_a}{T'_d} - 1 \right]. \quad (3)$$

Согласно (3), наиболее неблагоприятные условия имеют место при $\cos \theta_0 = 1$. Тогда

$$\frac{x_d - x'_d}{x'_d} \cdot \frac{e}{u} \leq \left[\frac{T_a}{T'_d} \right]^{\frac{1}{T'_d T_a - 1}} \left[\frac{T_a}{T'_d} - 1 \right]. \quad (4)$$

Кривая $\frac{x_d - x'_d}{x'_d} \cdot \frac{e}{u}$ в зависимости от отношения постоянных времени $\frac{T_a}{T'_d}$ построена на рисунке 1.

от параметров, а также величин угла нагрузки θ_0 , напряжения u и ЭДС $e = i_{f0} x_{ad}$ перед началом процесса отношение $\frac{i_f}{i_{f0}}$ не может стать отрицательным.

Учитывая, что в реальных ситуациях $\cos \theta_0 > 0$ ток возбуждения может изменить свой знак, когда последний член (1), соответствующий периодической составляющей i_{f0} и затухающий с постоянной времени T_a вместе с периодическим током якоря, станет больше суммы первых двух членов. Это условие может быть выполнено лишь при $T_a > T'_d$ и представляет скорее теоретический, нежели практический интерес.

Вместе с тем в синхронных машинах, снабженных полупроводниковыми возбудителями, величина T'_d подчас заметно снижается за счет появления в цепи фиктивного сопротивления $r_d = b \frac{\omega_1}{\omega_B} x_W$, эквивалентно учитывающего режим полупроводникового преобразователя [2]. Поэтому имеет смысл установить связь между основными параметрами машин, при которой возможно существование неравенства $i_f \leq 0$. С этой целью достаточно взять производную от правой части выражения (1) по относительному (синхронному) времени τ , приравнять ее нулю и найти значение $\tau = \tau_m$, при котором функция $\frac{i_f}{i_{f0}}$ достигает минимума. В первом приближении, осуществляя минимизацию по огибающей $\cos(\tau_m + \theta_0)$, получим

$$\tau_m = T'_d \frac{\ln \frac{T_a}{T'_d} \cos \theta_0}{1 - \frac{T'_d}{T_a}} \text{ при } T_a > T'_d. \quad (2)$$

Подставляя τ_m в уравнение (1) и полагая в точке минимума $\cos(\tau_m + \theta_0) = 1, \frac{i_f}{i_{f0}} \leq 0$, определим область возможных перенапряжений неравенством вида:

Здесь перенапряжения возможны в нижней заштрихованной зоне, причем для обычных значений индуктивных сопротивлений x_d, x'_d [5] только при $\frac{T_a}{T'_d} > 1,5$ и $\tau_m = (20-60)$ рад.

Характер изменения тока возбуждения для гипотетического генератора при $\frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 0,25, \frac{T_a}{T'_d} = 2,0, T_a = 0,2$ с (62,8 рад.), $\frac{e}{u} = 1,0, \cos \theta_0 = 1$ показан на рисунке 2. Нетрудно заметить, что по мере затухания апериодической составляющей тока возбуждения, благодаря искусственно завышенному отношению $\frac{T_a}{T'_d}$ при времени τ , близком к 18,5 рад. кривая $i_f(\tau)$ пересекает ось абсцисс, что при наличии вентильных элементов должно вызвать перенапряжение в цепи возбуждения.

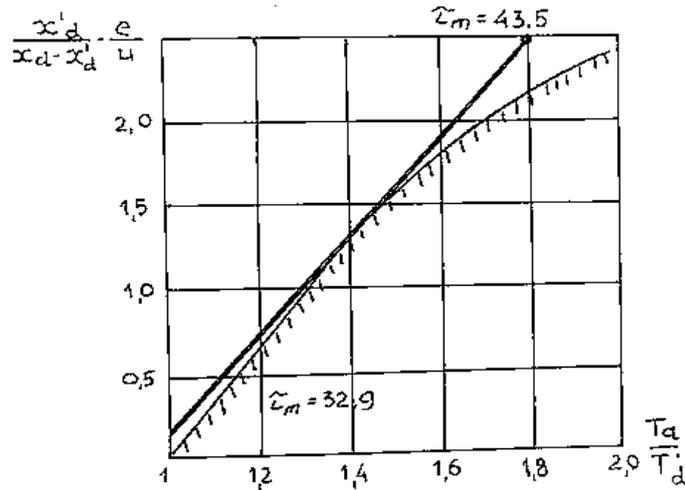


Рис. 1. К расчету перенапряжений на обмотке возбуждения при трехфазном коротком замыкании

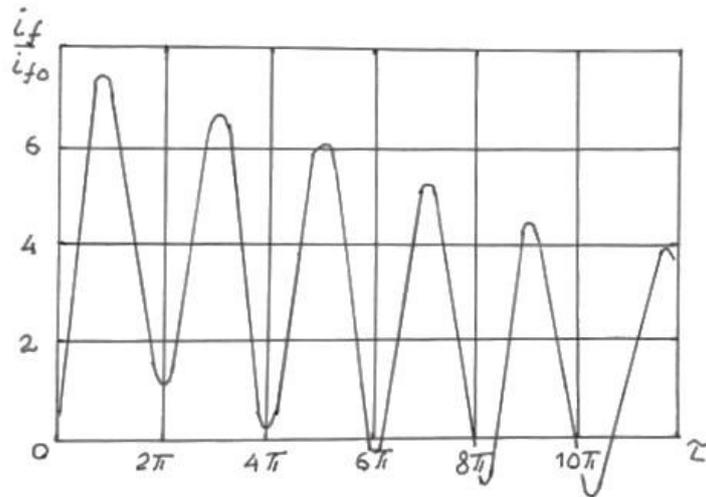


Рис. 2. Изменение тока возбуждения при трехфазном коротком замыкании

Наличие демпферной обмотки не приводит к каким-либо новым качественным результатам. В этом случае

$$\frac{i_f}{i_{f0}} = 1 + \frac{u}{e} \cos \left(\frac{x_{\sigma \Delta d} \cdot x_{ad}}{x_{\sigma f} \cdot x_d} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \right) e^{-\tau/T_d''} + \frac{u}{e} \cos \theta_0 \frac{x_d - x'_d}{x'_d} e^{-\tau/T_d'} - \frac{u}{e} \cos(\tau + \theta_0) \frac{x_{\sigma \Delta d} \cdot x_{ad}}{x_{\sigma f} \cdot x_d} e^{-\tau/T_a}. \quad (5)$$

Ток в демпферной обмотке относительно быстро затухает из-за малой величины постоянной времени T_d'' ($T_d'' \ll T_d'$). Тогда отрицательный знак у переменной i_f будет иметь место при выполнении неравенства:

$$\frac{e}{u} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} \varepsilon^{\tau_m/T'_d} \leq \frac{x'_d x_{\sigma 3d}}{(x'_d - x_{\sigma}) x_d} \varepsilon^{\tau_m/T'_d} (1 - T'_d/T_a) - \cos\theta_0. \quad (6)$$

Аналогично ранее проведенному исследованию функции (5) на экстремум позволяет записать:

$$\tau_m = T'_d \frac{\ln \frac{(x'_d - x_{\sigma}) x'_d \cdot T_a \cos\theta_0}{x'_d \cdot x_{\sigma 3d} \cdot T'_d}}{1 - T'_d/T_a}. \quad (7)$$

Следовательно,

$$\frac{e}{u} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} \cdot \left[\frac{(x'_d - x_{\sigma}) x'_d}{x'_d \cdot x_{\sigma 3d}} \right]^{1/1 - T'_d/T_a} \leq [\cos\theta_0]^{T'_d T_a / T'_d / T_a - 1} \left[\frac{T_a}{T'_d} \right]^{1/T'_d / T_a - 1}. \quad (8)$$

Появление в левой части критерия дополнительного по сравнению с (3) члена еще более снижает вероятность возникновения перенапряжения при симметричных коротких замыканиях синхронных машин с демпферной обмоткой.

Заключение

Полученные в удобной форме критериальные зависимости позволяют оценить влияние симметричных внешних коротких замыканий на условия возникновения перенапряжений на обмотке возбуждения синхронного генератора.

Библиографический список

1. Костелянец, В. С. Режимы и надежность работы тиристорного возбудителя синхронной машины / В. С. Костелянец. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с. – Текст: непосредственный.
2. Белый, В. Б. Моделирование процессов в системе возбуждения синхронных генераторов автономных систем электроснабжения с использованием внешних характеристик преобразователя / В. Б. Белый. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 11 (169). – С. 113-116.
3. Теоретические основы электротехники: в 3 томах. Т. 1 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Санкт-Петербург: Питер, 2003. – 463 с. – Текст: непосредственный.
4. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. – Ленинград: Энергия, 1980. – 256 с. – Текст: непосредственный.
5. Лютер, Р. А. Расчет синхронных машин / Р. А. Лютер. – Ленинград: Энергия, 1979. – 272 с. – Текст: непосредственный.

6. Electronic Control of Switched Reluctance Machines / Edited by T J E Miller. Oxford: Newnes, 2001.

7. CN205753452 (U), Jiang Yingwei, Hou Kai. Virtual topological structure of synchrodyne system of high pressure large capacity energy storage. - 2016-11-30.

References

1. Kostelianets V.S. Rezhimy i nadezhnost raboty tiristorного возбудителя sinkhronnoi mashiny. – Leningrad: Energoatomizdat, 1990. – 128 s.
2. Belyi V.B., Modelirovanie protsessov v sisteme возбуждения sinkhronnykh generatorov avtonomnykh sistem elektrosnabzheniia s ispolzovaniem vneshnikh kharakteristik preobrazovatelya / V.B. Belyi // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 11 (169). – S. 113-116.
3. Demirchian K. S. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: v 3 t. T. 1. / Demirchian K. S., Neiman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. – Sankt-Peterburg: Piter, 2003.– 463 s.
4. Vazhnov A.I. Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka / A.I. Vazhnov. – Leningrad: Energiia, 1980. – 256 s.
5. Liuter R.A. Raschet sinkhronnykh mashin / R.A. Liuter. – Leningrad: Energiia, 1979. – 272 s.
6. Electronic Control of Switched Reluctance Machines / Edited by T J E Miller. Oxford: Newnes, 2001.
7. CN205753452 (U), Jiang Yingwei, Hou Kai. Virtual topological structure of synchrodyne system of high pressure large capacity energy storage. - 2016-11-30.

