Возросла сила сплющивания газовых пузырьков (F_{1max}, табл. 1 и 2) и уменьшена сила вытягивания водяных капель (F_{2max}, табл. 1 и 2).

В отличие от верхней части табл. 2, в нижней части принято, что газовые пузырьки сильно сплющены ($N_1 = 0,85$), а капельки воды резко вытянуты ($N_2 = 0,1$). Длины полуосей а эллипсоидов в табл. 2 выбраны ориентировочно, т.к. коэффициенты N эллипсоидов вращения определяются отношением осей a/b, которые в процессе вытягивания изменяются при неизменном объеме шара, т.е. $a'_{ш} = a_{ш} b'_{ш}$.

Из нижней части табл. 2 следует, что сплющивание пузырьков газа усиливает их влияние на распределение поля в исследуемой полидисперсной системе. Несмотря на наличие в системе капелек воды, результирующее поле взаимодействия отрицательное $E_{в} < 0$, а поляризующее включения поле слабее внешнего ($E_{в} < E_{0}$). В результате этого напряженность поля в масле E_{12} существенно меньше E_{0} (верхняя часть табл. 2). Но при этом не снижается опасность пробоя промежутков масла между соседними капельками воды. Сплющивание газовых пузырьков, однако, обуславливает резкое повышение напряженности поля в газе, что может привести к частичному пробою этих включений, а со временем и всей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карапетян М.А.** Исследование электрического поля в неоднородной среде. – Ереван: Айастан, 1980. – 216 с.
2. **Կարապետյան Մ.Ա., Հակոբջանյան Գ.Դ.** Էլեկտրատեխնիկայի տեսական հիմունքները. II մաս. – Եր.: Լույս, 1989. – 449 էջ.

ԳԻՍԱ 20.03.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LII, № 2, 1999, с. 186-192.

УДК 621.316.933 **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

М.М. КАРАПЕТЯН, В.Г. ВАРТАЗАРЯН

ГРОЗОЗАЩИТА МГЭС НОВЕЙШИМИ ЗАЩИТНЫМИ АППАРАТАМИ

Դիտարկված է ամպրոպային գերլարումներից ՓՆԷԿ-ի պաշտպանության անհրաժեշտությունը: ՀԷՍԻ «Կայծակ»-ում պատրաստված և մշակված հատուկ նորագույն պաշտպանիչ ապարատներով: Այս ներդրումը «Կայծակ»-ում կապահովի ՓՆԷԿ-ի ամպրոպակայունության բարձր ցուցանիշները, էներգիայի շահագործման հուսալիությունը և զգալիորեն կնվազեցնի կապիտալ ծախսերը:

Рассмотрена необходимость выбора грозозащиты МГЭС с применением соответствующих уровню мирового стандарта новейших защитных аппаратов, разрабатываемых и изготавливаемых АИВТ "Кайцак". Применение этих аппаратов обеспечит высокие показатели грозоупорности МГЭС, повысит надежность эксплуатации и значительно уменьшит капитальные затраты.
Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.. 7 назв.

Necessity for choice of SHEPP-s lightning protection by means of the newest protecting equipment conforming to the high standard of technology developed and manufactured by the Armenian Institute of High-Voltage Engineering (AIHVE) "Kajtsak" is considered. The equipment will provide a high index in SHEPP-s lightning protection increase operational reliability and substantially reduce capital expenditures
Ill. 2. Table 1. Ref. 7.

Годовая выработка МГЭС, работающих на бытовом стоке малых рек, существенным образом зависит от эффективности мер по исключению аварийных простоев в периоды половодья. Поскольку половодье часто совпадает с сезоном интенсивной грозовой деятельности, то для энергоэкономической эффективности МГЭС особое значение приобретают вопросы обеспечения надежной грозозащиты.

Для станций с непосредственным выходом генераторного напряжения на воздушные линии (ВЛ) высоковольтной сети наиболее ответственной областью грозозащиты является защита генераторов от набегающих с ВЛ волн грозового перенапряжения (ВГП). Как известно, амплитуды ВГП ($U_{ВГП}$) в десятки раз превышают импульсную прочность $U_{ВМ}$ главной изоляции вращающихся машин (ВМ) [1], которая согласно [2] нормируется довольно низким уровнем

$$U_{ВМ} = 1.5\sqrt{2}U_{ном}, \qquad (1)$$

где $1.5U_{ном}$ - испытательное напряжение главной изоляции ВМ на послеремонтном этапе эксплуатации.

Таким образом, перед системой защиты ВМ от ВГП стоит сложная задача ограничения высоких амплитуд грозовых перенапряжений до значительно более низкого уровня $U_{п}$ (защитный уровень), при котором обеспечивается условие $U_{п} \leq U_{ВМ}$, т.е. осуществляется координация допустимых для изоляции ВМ импульсных напряжений с уровнем ограничения перенапряжений $U_{п}$ схемы грозозащиты.

В действующих до настоящего времени системах грозозащиты ВМ, в частности генераторов, главную роль в координации изоляции играют вентильные разрядники (РВ). Защитное действие РВ определяется в основном вольтамперной характеристикой (в.а.х.) карборундового рабочего резистора (РР), которая обычно аппроксимируется зависимостью

$$U_{рр} = H_{рр} A_{н} I^{\alpha}_{рр}, \qquad (2)$$

где $U_{рр}$ и $I_{рр}$ - амплитуды соответственно напряжения на РР и тока через него; $H_{рр}$ - высота колонки РР; α - коэффициент нелиней-

ности материала РР; A_n - коэффициент, зависящий от диаметра диска РР единичной высоты.

Как известно, в РВ минимально допустимое значение $H_{пр}$ определяется условием гашения в искровых промежутках (ИП) дуги тока рабочей частоты (сопровождающий ток), протекающего через РР под воздействием восстанавливающегося рабочего напряжения. Из (2) имеем

$$H_{пр} \geq \sqrt{2}U_{н.р} / A_{ор} I_{гаш}^{\alpha_р}, \qquad (3)$$

где $U_{н.р}$ - действующее значение наибольшего рабочего напряжения сети; $I_{гаш}$ - амплитуда сопровождающего тока, при которой происходит надежное гашение дуги в ИП при переходе синусоидального тока через ноль; $A_{ор}$ и $\alpha_р$ - значения коэффициентов из (2) в интервале в.а.х. РР, соответствующем уровням рабочих напряжений.

Значения $I_{гаш}$ зависят от способа функционирования дуги и не превышают 100 *А* в ИП с неподвижной дугой и 250 *А* в ИП с вращающейся дугой.

Обусловленное ограничение (3) минимального значения $H_{пр}$ определяет защитный уровень РВ, характеризуемый так называемым остающимся напряжением $U_{I_н}$ при нормированных импульсах тока $I_н$, например, при $I_н$=5 *кА*. Из (2) и (3) с учетом того, что в сетях с изолированной нейтралью $U_{н.р} = 1.1U_{ном}$, имеем

$$U_{ост} = U_{I_н} = H_{пр} A_{пг} I_н^{\alpha_г} = 1.1\sqrt{2}U_{ном} A_{пг} I_н^{\alpha_г} / A_{ор} I_{гаш}^{\alpha_р}, \qquad (4)$$

где $A_{пг}$ и $\alpha_г$ - значения коэффициентов из (2) в интервале в.а.х. РР, соответствующем уровням ВГП.

Для машинных разрядников типа РВМ с вилитовым РР ($\alpha_р = 0.3$, $\alpha_г = 0.13$) согласно (4) имеем $U_{I_н=5кА} = 2.05\sqrt{2}U_{ном}$. Сравнение этого значения с (1) показывает, что при $I_н = 5кА$ $U_{ост} = U_{I_н=5кА} > U_{ин}$, т.е. при нормированном токе 5 *кА* разрядник РВМ не обеспечивает координацию изоляции. Очевидно, чтобы соблюдалось условие $U_{ост} < U_{ин}$, соответствующий импульсный ток через разрядник, называемый током координации, должен быть ограничен некоторым значением $I_к < I_н$. Кратность этого ограничения с некоторым приближением определяется из соотношения

$$I_к / I_н = (U_{I_к} / U_{I_н})^{1/\alpha_г} = (U_{ИМ} / U_{I_н})^{1/\alpha_г}, \qquad (5)$$

полученного путем соответствующих подстановок и преобразований (2). Для разрядников РВМ имеем $I_к / I_н = 0.11$ или $I_к = 0.55кА$. В системах грозозащиты ограничение токов молнии $I_м$ до значений $I_к$ осуществляется подходом определенной длины $\ell_{пр}$, обустроенным по всей длине защитой от прямых ударов молнии и трубчатыми разрядниками РТ. Ограничение подходами всего спектра возможных

амплитуд $I_м$ до столь малых значений I_1 часто технически невозможно или экономически невыгодно. Обычно параметры подхода выбираются из расчета ограничения до значений I_1 определенного расчетного тока молнии $I_{мр}$. Тогда при $I_м > I_{мр}$ система грозозащиты не обеспечит координацию, т.е. с частотой пропорциональной вероятности $P(I_м \geq I_{мр}) = e^{-\alpha I_{мр}}$ [3], на изоляцию ВМ могут воздействовать опасные ВГП. Очевидно, чем меньше эта вероятность, тем выше показатель грозоупорности (надежности) системы грозозащиты $П_{гр}$, представляющий собой число лет безаварийной работы ВМ.

Таблица

Схема рис.1	$П_{гр}$ / $П'_{гр}$ при испытательном напряжении		
	$U_{исп} = 1{,}5\sqrt{2}U_н$	$U_{исп} = 1{,}7\sqrt{2}U_н$	$U_{исп} = 1{,}9\sqrt{2}U_н$
а	5.5/5,5	10/10	20/20
б	6/7	16/16	37/38
в	9/710	15/очень выс.	43/очень выс.
г	7.2/15	34/44	150/150
д	5.5/3.2	24/140	117/550
$R_{экв}$ =56 Ом	6/110	13/очень выс.	175/очень выс.
е			
$R_{экв}$ =7,4 Ом	7/430	14/очень выс.	175/очень выс.

$П'_{гр}$ - при надежном срабатывании всех разрядников подхода

По виду связи генератора с ВЛ малым ГЭС соответствует вариант рис.1а [4,5]. Именно по этому варианту (табл.) показатель грозоупорности имеет довольно невысокое значение. Поскольку при среднем сроке службы $П_{ср}$ защищаемого оборудования надежность грозозащиты считается удовлетворительной, если имеет место $П_{гр} \geq П_{ср}$, то значения $П_{гр}$ = 5...7 *лет* при сроке службы генераторов $П_{ср}$ =20 *лет*, очевидно, совершенно не отвечают приведенным выше требованиям к грозозащите МГЭС.

Из (5) видно, что более высоких значений I_1, а следовательно, $I_{мр}$ и $П_{гр}$, можно достичь уменьшением U_1 путем улучшения характеристик защитных аппаратов [6,7]. Последнее, согласно (2) и (3), возможно лишь при использовании РР с существенно малыми значениями α.

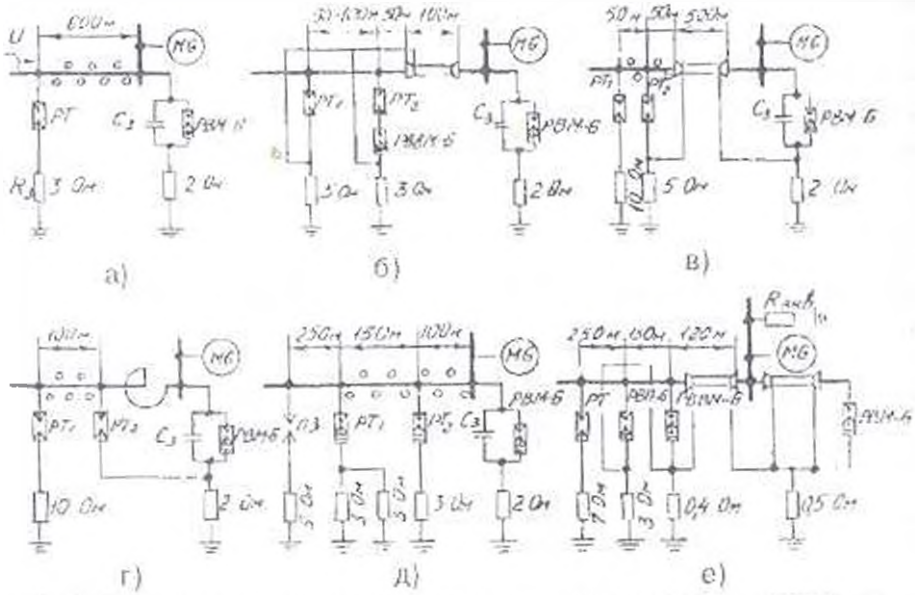

Рис. 1. Типичные схемы грозозащиты вращающихся машин (MG) 6 *кВ*

Решение вопросов грозозащиты ВМ именно в этом направлении стало возможным с появлением оксидноцинковых нелинейных резисторов (ОЦР) с коэффициентом нелинейности примерно на порядок меньшим, чем у карборундовых (вилитовых) резисторов. Высокая нелинейность РР из ОЦР ($\alpha = 0.04...0.07$) позволяет исключить из схем защитных аппаратов последовательные ИП, перейдя к выпуску безыскровых ограничителей перенапряжений (ОПН). Как видно из электрической схемы ОПН (рис.2а), РР этого аппарата в течение всего срока службы находится под непосредственным воздействием рабочего фазного напряжения. Стабильность в.а.х. ОЦР в этих условиях требует определенного ограничения проводимости, что обеспечивается выполнением условия

$$U_{ф.р} \le U_{доп}, \qquad (6)$$

где $U_{доп}$ - допустимое на ОПН действующее значение напряжения промышленной частоты.

Для ОЦР типа МНР- 58 имеем

$$U_{доп} = \beta \cdot U_{I_к=5кА} / \sqrt{2}, \qquad (7)$$

где $\beta = 0.487$ - коэффициент пропорциональности при неограниченной длительности приложения к ОПН данного значения $U_{доп}$.

Для ОПН, работающих в сетях с изолированной нейтралью, из (6) и (7) имеем

$$U_{I_к=5кА} \ge 1.1\sqrt{2}U_{ном} / \beta = 3.184U_{ном}. \qquad (8)$$

Подставив (8) в (5), получим, что при использовании ОПН взамен РВМ в схемах рис.1а ток координации равен $I_к = 13А$, что

значительно хуже, чем при РВМ. Таким образом, несмотря на высокую нелинейность ОЦР, условие (6) заметно ухудшает защитное действие ОПН, делая этот аппарат в качестве защитного средства ВМ совершенно неэффективным.

Ограничивающее возможности ОЦР условие (6) в той или иной мере компенсируется рядом схемных решений, основанных на известном принципе шунтирования части РР искровыми промежутками (рис.2б). В АИВТ "Кайцак" разработана схема искрового ОПН (ОПНИ), полностью исключающая необходимость учета условия (6). Данное техническое решение (рис.2в) предусматривает включение РР в диагональ уравновешенного моста, плечи которого выполнены из высокоомных омических или емкостно-омических сопротивлений Z, причем два противоположных плеча шунтированы ИП. Срабатывание ИП происходит при напряжении на выводах ОПНИ, равном

$$U_{пр} \geq (1.3...1.4)U_{нр}. \qquad (9)$$

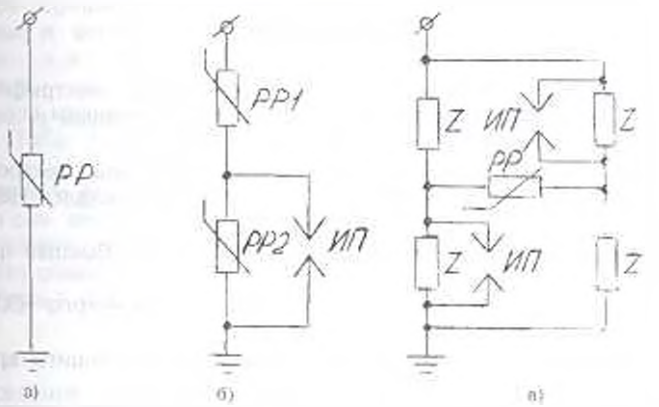

Рис. 2. Принципиальные схемы защитных аппаратов 6-10 *кВ* на базе оксидноцинковых высоконелинейных резисторов (ОЦР)

Таким образом, в нормальных рабочих режимах и при квазистационарных перенапряжениях ИП отстроены от воздействующих напряжений, а РР в силу уравновешенности моста находится под нулевой разностью потенциалов. При перенапряжениях с амплитудами выше $\sqrt{2}U_{нр}$ ИП срабатывают и вводят РР в цепь высокого напряжения. После гашения в ИП дуги сопровождающего тока уравновешенность моста восстанавливается, а РР вновь переходит в исходное бестоковое состояние. При таком принципе работы высота колонки РР определяется не условием (6), а, как и в вентильных разрядниках, условием гашения дуги в ИП, что позволяет максимально использовать высокую нелинейность ОЦР. Например, приняв для ОПНИ в схеме грозозащиты по рис.1а $I_{п}=5кА$, $U_{I_{п}=5кА}=U_{ВМ}=1.5\sqrt{2}U_{ном}$ и учитывая, что в оксидноцинковом резисторе типа МНР-58 $\alpha_{п}=0.068$, $A_{ш}=1640$, из (2) найдем высоту колонки РР $H_{ОПНИ}=1.5\sqrt{2}U_{ном}/A_{ш}I_{п}^{\alpha}=4.56U_{ном}$. Подставив это значение $H_{ОПНИ}$ в (3) и учитывая, что в диапазоне рабочих

напряжений МНР-58 имеет $\alpha_{\text{р}} = 0.03$, $A_{\text{т}} = 2000$, находим $I_{\text{гаш}} = 7A$. Таким образом, мостовая схема ОПНИ при высоком значении $I_{\text{к}} = 5$ *кА* обеспечивает весьма малые значения амплитуд сопровождающего тока, что позволяет использовать простые по конструкции ИП с неподвижной дугой и резко сократить их общее количество. Расчет по приведенной в [3] методике показателя грозоупорности схемы грозозащиты (рис.1а) с ОПНИ вместо РВМ показывает, что $\Pi_{\text{гз}} = 35$ *лет*, т.е. с достаточным запасом обеспечивается условие $\Pi_{\text{гз}} > \Pi_{\text{гз}}$.

Таким образом, мостовая схема ОПНИ на базе ОЦР позволяет резко повысить эффективность схем грозозащиты МГЭС, а при использовании в других схемах обеспечить как высокую надежность грозозащиты ВМ, так и значительное упрощение параметров подходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карапетян М.М.** Схема грозозащиты передвижных электрифицированных агрегатов 6-10 кВ // Переходные и установившиеся режимы в электрических системах. Труды / ЛПИ. - М., Л., 1965. - С. 37-41.
2. **Руководящие указания** по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока 3-220 кВ. - М.: Госэнергоиздат, 1953. - С. 62-66.
3. **Костенко М.В.** Техника высоких напряжений. - М.: Высшая школа, 1973. - С. 343-389.
4. **Правила** устройства электроустановок / Минэнерго СССР. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 640 с.
5. **Половой И.Ф.** и др. Оценка надежности схем грозозащиты вращающихся машин // Электричество. - 1962. - №7. - С. 30-35.
6. **Нормы** испытания электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей. - М.: Энергия, 1982. - 176 с.
7. **Rotating** Electrical Machines. Part 35. Impulse voltage withstand levels of rotating a.c. machines with form-wound stator coils: International Standard IEC 34-15. First edition. - 1990-04. - 15p.

АИВТ "Кайшан" 22.01.1998