

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO APLICADO A UM COMUTADOR ELETRÔNICO DE *TAPS* DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO MRT

JOSEMAR O. QUEVEDO, FABRICIO E. CAZAKEVICIUS, RAFAEL C. BELTRAME, PABLO F. S. COSTA, LUCIANO SCHUCH

*Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Av. Roraima, 1000, Camobi, Cidade Universitária, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil*

*E-mails: josemar.quevedo@mail.ufsm.br, fabriciocazakevicius@gmail.com,
beltrame@gepoc.ufsm.br, pablofscosta@gmail, schuch.prof@gmail.com*

Abstract— The voltage regulation based on electronic on-load tap changers in distribution systems is expected to be a step towards the increasing of the voltage levels and power flow controllability in primary and secondary distribution systems. However, for the effective use of such equipment, a proper protection system is necessary in order to permit the safe operation of the electronic switches during the transformer operation. In this sense, this work presents the design and practical implementation of a protection system for an electronic on-load tap changes. The proposed topology is applied to a 5 kVA, 7.69 kV/440 V/220 V single-wire earth return distribution transformer (SWER).

Keywords— Distribution transformer, electronic on-load tap changer, protection system.

Resumo— A regulação de tensão através de comutadores eletrônicos de *taps* em sistemas de distribuição é esperada como um avanço para o aumento da controlabilidade dos níveis de tensão e do fluxo de potência nas redes de distribuição primárias e secundárias. No entanto, para o efetivo emprego destes equipamentos, um sistema de proteção adequado se mostra necessário a fim de permitir a operação segura das chaves eletrônicas durante a operação do transformador. Neste sentido, o presente trabalho apresenta o projeto e implementação prática de um sistema de proteção para comutadores eletrônicos de *taps*. A topologia proposta é aplicada a um transformador de distribuição monofásico com retorno por terra (MRT) de 5 kVA, 7,69 kV/440 V/220 V.

Palavras-chave— Regulador de tensão, comutador eletrônico de *taps*, sistema de proteção, transformador de distribuição.

1 Introdução

As redes elétricas de distribuição têm sido ampliadas e modernizadas com o passar dos anos. No entanto, com a crescente demanda por energia elétrica, a maior complexidade dos sistemas elétricos e um maior compromisso social com o meio ambiente, uma série de modificações têm se mostrado necessárias, de modo a atender os consumidores finais com maior qualidade, segurança, confiabilidade e responsabilidade ambiental (Kezunovic *et al*, 2012).

Essa preocupação com a melhoria dos sistemas elétricos tem refletido num maior rigor por parte das agências reguladoras do setor elétrico no que diz respeito à qualidade de energia e serviços oferecidos (ANEEL, 2016). Além disso, a busca pelo maior uso de fontes de energia renováveis tem favorecido à injeção de geração distribuída (GD) ao longo das redes de distribuição. Estes fatores impactam diretamente nos níveis de tensão entregues aos consumidores finais.

Historicamente, o método de regulação de tensão mais empregado nos sistemas de distribuição tem sido o uso de comutadores de *taps* em transformadores. Na interface entre a rede primária e secundária (transformador de distribuição), geralmente são empregados comutadores de *taps* mecânicos de operação manual sem carga. Por outro lado, comutadores de *taps* eletromecânicos de operação sob carga (*on-load tap changer* – OLTC), que permitem a regulação automática da tensão, são empregados majoritariamente em transformadores de subestações e reguladores de tensão ao longo das redes primárias. Isso

ocorre devido aos elevados custos de implementação e a necessidade de manutenção frequente destes equipamentos (Faiz e Siahkollah, 2011).

Com o aumento dos níveis de tensão e corrente das chaves semicondutoras, o desenvolvimento de comutadores eletrônicos de *taps* passou a ser vislumbrado (García *et al*, 2009). Estes dispositivos permitem a regulação automática da tensão fornecida pelo transformador, e, quando associados a um maior sensoriamento e sistemas de gerenciamento, tornam-se uma solução em potencial para a melhoria nas redes elétricas atuais e futuras (Amin e Wollenberg, 2005).

Apesar das potencialidades dos comutadores eletrônicos de *taps*, estes dispositivos requerem um sistema de proteção adequado, que seja capaz de proteger os circuitos eletrônicos contra faltas ocorridas nas redes elétricas (Faiz e Siahkollah, 2011). Atualmente, os circuitos de proteção representam o principal desafio à implementação dos comutadores eletrônicos de *taps* nos sistemas de distribuição, pois devem proteger o sistema contra: sobrecarga e curto-circuito no lado da carga, bem como sobretensão e descargas atmosféricas originárias tanto do lado primário quanto secundário do transformador.

Com base nisso, o presente trabalho apresenta o projeto e a implementação prática de um sistema de proteção para comutadores eletrônicos de *taps*. É apresentada a análise dos níveis de tensão e corrente de operação do comutador eletrônico, bem como os parâmetros de projeto do sistema de proteção proposto. Por fim, são apresentados resultados experimentais da implementação do sistema em transformador de distribuição monofásico com retorno por terra

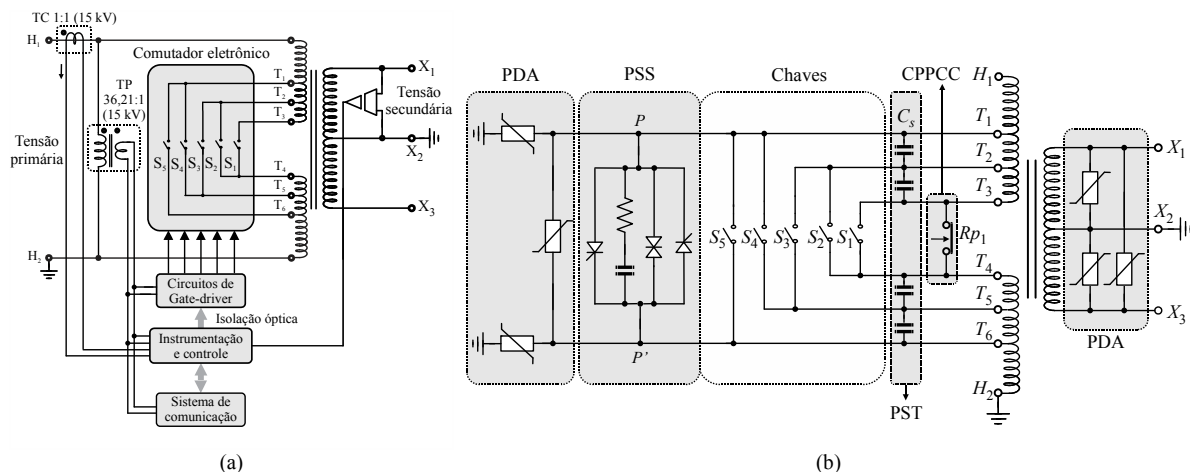


Figura 1. Comutador eletrônico de *taps*. (a) Esquemático de circuitos auxiliares. (b) Sistema de proteção.

(MRT) de 5 kVA, classe de isolamento 15 kV, 7,69 kV/440 V/220 V.

2 Comutador Eletrônico de *Taps*

O transformador de distribuição com comutador eletrônico de *taps* é apresentado na Figura 1 (a). Utilizam-se chaves semicondutoras controladas (*Insulated Gate Bipolar Transistors* – IGBTs) na configuração anti-série, e com diodos em antiparalelo, na implementação das chaves bidirecionais S_1 a S_5 que comutam os *taps*. Os circuitos de acionamento das chaves eletrônicas (*gate-drivers*) apresentam a mesma classe de isolamento do transformador e são acionados por canais ópticos, garantindo elevada isolamento elétrica e imunidade a ruídos eletromagnéticos.

A corrente primária do transformador é medida através de um transformador de corrente (TC) e serve de referência para que as comutações ocorram no cruzamento por zero. Um transformador de potencial (TP) é utilizado para medir a tensão primária e alimentar os circuitos auxiliares do comutador eletrônico. A tensão secundária é medida e serve como referência para regulação da tensão na rede secundária, que tem por objetivo manter os níveis de tensão dentro dos limites considerados adequados por normativa vigente (ANEEL, 2016). O processo de comutação entre as chaves eletrônicas necessita de um período de sobreposição, evitando que o circuito primário fique em aberto e a tensão primária seja aplicada integralmente sobre as chaves eletrônicas.

3 Sistema de Proteção

A proteção contra faltas nas redes de distribuição é um dos principais desafios à implementação de comutadores eletrônicos de *taps*. Isso se deve à ação de eventos com elevado potencial de danos, como, por exemplo: manobras na rede elétrica, curto-circuitos, operação de sistemas de proteção, inclusão ou retirada de equipamentos e descargas atmosféricas.

Os circuitos de proteção apresentados na Figura 1 (b) têm por objetivo: (i) garantir a partida do

comutador eletrônico de *taps* quando da energização do transformador; (ii) proteger as chaves semicondutoras contra sobrecorrentes e curto-circuito no secundário do transformador; (iii) proteger as chaves semicondutoras contra sobretensões; e (iv) proteger os circuitos de potência e controle contra descargas atmosféricas ocorridas no lado de alta e baixa tensão.

3.1 Definição das chaves eletrônicas

O projeto das chaves eletrônicas a serem protegidas deve considerar os níveis de corrente e tensão de operação. Com respeito à Figura 1 (a), é possível demonstrar que o máximo nível de corrente ocorre quando a chave S_5 encontra-se operando para potência nominal do transformador, cujo valor é dado por:

$$I_{S5} = \left(\sqrt{2} N_{sec} S \right) / \left[V_{sec} (N_{total} - 4N_{tap}) \right] \quad (1)$$

onde: I_{S5} é a corrente através da chave S_5 para a potência nominal do transformador (S); V_{sec} é a tensão secundária nominal; N_{sec} , N_{total} e N_{tap} são, respectivamente, as relações de transformação dos enrolamentos secundário, primário e de *taps*, tomando por referência o enrolamento secundário.

É possível demonstrar também que a máxima tensão a ser suportada pelas chaves eletrônicas ocorre através da chave S_1 quando a chave S_5 está acionada, sendo dada por:

$$V_{S1} = \left(\sqrt{2} V_{pri} 4N_{tap} \right) / (N_{total} - 4N_{tap}) \quad (2)$$

onde, V_{S1} representa a máxima tensão sobre a chave S_1 e V_{pri} é a tensão primária eficaz da rede.

3.2 Circuito de Partida e Proteção de Curtos-Circuitos (CPPCC)

O circuito de partida e proteção contra curtos-circuitos (CPPCC), representado na Figura 1 (b), possui uma chave eletromecânica (Rp_1) com contato normalmente fechado (NF), a qual tem o propósito de garantir que os *taps* centrais do transformador estejam conectados no momento da energização do equipamento, impedindo que a tensão total da rede primária

seja aplicada às chaves eletrônicas. Essa ação ainda garante a menor tensão secundária na partida do transformador, uma vez que a relação de transformação entre primário e secundário é máxima.

O CPPCC tem por propósito adicional realizar um *bypass* das chaves eletrônicas bidirecionais na ocorrência de curto-circuito no secundário do transformador até que a proteção do alimentador primário atue, evitando assim que as chaves semicondutoras tenham de ser projetadas para operar nessa condição.

Desse modo, o nível de corrente do CPPCC deve ser compatível com a corrente primária resultante do curto-circuito no lado secundário do transformador. De acordo com a Figura 1 (a), como a relação entre impedância e tensão entre os enrolamentos X_1 - X_2 , X_2 - X_3 e X_1 - X_3 é a mesma, o curto-circuito pode ser considerado entre os terminais X_1 - X_2 , como mostrado no circuito T equivalente da Figura 2, onde: L_m é a indutância de magnetização; L_{pri} e R_{pri} são a indutância de dispersão e a resistência do enrolamento primário; e L_{sec} e R_{sec} são a indutância de dispersão e a resistência do enrolamento secundário. Assim, a corrente primária para um curto-circuito no secundário é dada por:

$$I_{p,cc} = |V_{pri} / [Z_{pri} + (\alpha_1 X_m \parallel \alpha_1 Z_{sec})]| \quad (3)$$

onde: $I_{p,cc}$ é a corrente eficaz primária para curto-circuito nos terminais do secundário, ω é a frequência angular da rede, $X_m = j\omega L_m$ é a impedância de magnetização, $Z_{pri} = R_{pri} + j\omega L_{pri}$ é a impedância do circuito primário, $Z_{sec} = R_{sec} + j\omega L_{sec}$ é a impedância do circuito secundário e $\alpha_1 = (N_{total}/N_{sec})^2$ é o coeficiente de conversão de variáveis do lado secundário para o primário do transformador.

Deve-se observar que o nível de tensão de operação de R_{p1} deve ser superior a V_{S1} .

3.3 Proteção de Sobrecorrente e Sobreensão (PSS) - Crowbar

O sistema de proteção de sobrecorrente e sobreensão (PSS), apresentado na Figura 1 (b) e detalhado na Figura 3, também denominado *crowbar*, possui duas finalidades: proteger o comutador eletrônico de *taps* contra sobrecorrentes, bem como contra sobreensões ocorridas na rede elétrica (Bauer e de Haan, 1997).

Por apresentar operação mais rápida, uma das funções da PSS é auxiliar a entrada de operação do CPPCC para o caso de curto-circuito do secundário do transformador. O PSS atua rapidamente, tão logo o curto-circuito é identificado, e, após a efetiva entrada de operação do CPPCC, o primeiro é desativado.

Outra função da PSS é a proteção por sobrecorrente, que é ativada pelo sistema de controle do comutador eletrônico de *taps* quando a corrente primária ultrapassa em 20% da corrente I_{S5} . Neste caso, conforme apresentado na Figura 3, os tiristores da PSS desviam a corrente das chaves eletrônicas. O acionamento dos tiristores nesse caso é realizado pelo circuito de controle, o qual é possibilitado pelo emprego de uma fonte isolada.

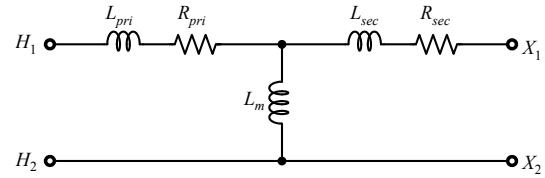


Figura 2. Circuito T equivalente refletido ao primário.

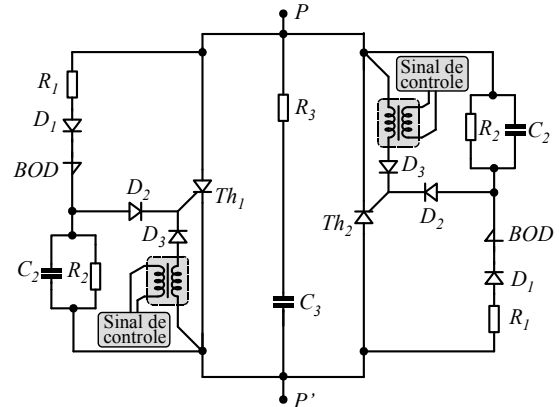


Figura 3. Circuito de crowbar (PSS).

Como os tiristores requerem alguns microssegundos para entrar efetivamente em condução, a chave eletrônica S_5 (formada por IGBTs) é sempre colocada em operação simultaneamente quando da operação da PSS. Desta forma, a chave eletrônica que operava previamente à falta pode abrir rapidamente, evitando um elevado período de sobreposição com o PSS.

Deve-se salientar que, como a queda de tensão sobre os IGBTs da chave S_5 é inferior à do tiristores, a corrente passa a fluir naturalmente através dos tiristores quando estes entram em operação. Por isso, a chave S_5 pode permanecer sempre acionada juntamente com o PSS. Este procedimento também evita distorções da forma de onda próximo ao cruzamento por zero da corrente, devido à saída de operação dos tiristores em função dos níveis de corrente de *latch* e *hold*.

A proteção por sobreensão atua automaticamente sempre que a tensão entre os pontos P e P' – apresentados na Figura 3 – ultrapassa o nível de atuação do *break over diode* (BOD). Quando isso ocorre, o diodo D_1 entra em condução e uma tensão aparece sobre o resistor R_2 , que resulta no acionamento dos tiristores Th_1 ou Th_2 . Os diodos D_1 garantem o bloqueio de tensão reversa sobre os BODs e os resistores R_1 têm a função de limitar a corrente (Bauer e de Haan, 1997). Os diodos D_2 e D_3 têm a função de proteger o *gate* dos tiristores Th_1 e Th_2 . Os resistores R_2 e os capacitores C_2 evitam um acionamento indevido dos tiristores.

Para o dimensionamento do circuito de PSS pode-se utilizar o método apresentado por (Bauer e de Haan, 1997). A corrente de operação dos tiristores deve ser superior a 20% da corrente I_{S5} e a corrente não repetitiva deve ser superior a corrente $I_{p,cc}$. Por outro lado, é possível demonstrar que máximo o nível de tensão que aparece entre P - P' ($V_{PP'}$) ocorre quando a chave S_1 está em operação, sendo dado por:

$$V_{PP'} = \left(\sqrt{2} V_{pri} 4 N_{tap} \right) / N_{total} \quad (4)$$

3.4 Proteção contra Descargas Atmosféricas (PDA)

Para a implementação de comutadores eletrônicos de *taps* em sistemas de distribuição, além da proteção por para-raios, comumente empregada em transformadores de distribuição, há a necessidade de proteções adicionais contra descargas atmosféricas tanto do lado primário quanto secundário do transformador. De modo a atender estas necessidades, *Metal-Oxide Varistors* (MOV) são instalados em configuração diferencial e de modo comum tanto no lado secundário do transformador quanto em paralelo com o circuito de PSS.

Para a proteção no lado secundário do transformador, os dispositivos empregados devem estar de acordo com a tensão da rede elétrica. Para a proteção diferencial do lado primário do transformador, o dispositivo empregado deve atuar para níveis de tensão superiores a tensão V_{PP} , obtida a partir de (4). A proteção de modo comum deve ser projetada para os máximos níveis de tensão que aparecem entre os terminais P (V_P) e P' ($V_{P'}$) e a terra. É possível demonstrar estes valores ocorrem para V_P quando a chave S_1 encontra-se em operação, conforme (5), e para $V_{P'}$ quando a chave S_5 encontra-se operando, conforme (6).

$$V_P = \left[V_{pri} (N_{total} + 4N_{tap}) \right] / (2N_{total}) \quad (5)$$

$$V_{P'} = V_{pri} / 2 \quad (6)$$

3.5 Proteção contra Surto de Tensão (PST)

Na comutação de *taps* do transformador, o tempo de sobreposição entre duas chaves eletrônicas resulta em uma corrente de curto-circuito no enrolamento de *tap* comutado. A corrente resultante ataca a chave que é retirada de operação, podendo danificá-la se não houver um desvio da mesma. Os capacitores empregados na proteção contra surtos de tensão (PST) desviam esta corrente e limitam o pico de tensão sobre a chave que é aberta durante a comutação (Bauer e de Haan, 1998).

O capacitor pode ser definido considerando que a energia armazenada na indutância de dispersão do enrolamento de *tap* (E_{Ltap}) deve ser transferida ao capacitor. A energia da indutância de dispersão é:

$$E_{Ltap} = 0,5 L_{tap} I_{overlap}^2 \quad (7)$$

onde $I_{overlap}$ é a corrente resultante da sobreposição de duas chaves eletrônicas na comutação e L_{tap} é a indutância de dispersão do enrolamento de *tap*.

Considerando que a comutação ocorre na passagem por zero da corrente primária e que a carga alimentada pelo transformador é puramente indutiva, a tensão do enrolamento de *tap* terá seu valor de pico na comutação, que é o pior caso possível. Isto resulta na seguinte corrente de sobreposição das chaves:

$$I_{overlap} = \left(\sqrt{2} V_{tap} \Delta_t \right) / L_{tap} \quad (8)$$

onde: Δ_t é o tempo de sobreposição das chaves, definido entre 10 μs e 50 μs , e V_{tap} é a máxima tensão eficaz que aparece sobre o enrolamento de *tap* (ocorrendo ocorre quando S_5 está acionada) que é dada por:

$$V_{tap} = V_{pri} \left[N_{tap} / (N_{total} - 4N_{tap}) \right] \quad (9)$$

Em (10) é apresentada a energia a ser transferida da indutância de dispersão ao capacitor da PST (E_{cap}):

$$E_{cap} = 0,5 C_s \left[\underbrace{\left(\sqrt{2} V_{tap} + \Delta V_c \right)^2}_{E_1} - \underbrace{\left(\sqrt{2} V_{tap} \right)^2}_{E_2} \right] \quad (10)$$

onde: E_{cap} é a energia transferida ao capacitor, C_s é a capacitância e ΔV_c é a máxima variação da tensão permitida sobre o capacitor para uma dada corrente de sobreposição, que é dada por:

$$\Delta V_c = \sqrt{2} V_{tap} (\Delta V_{\%} / 100) \quad (11)$$

Considerando que em (10) a comutação ocorre quando a tensão do enrolamento de *tap* encontra-se em seu valor de pico, a energia armazenada no capacitor previamente à comutação (E_2) deve ser subtraída da energia total armazenada no capacitor após a comutação do *tap* (E_1), a fim de se ter a energia transferida da indutância de dispersão para o capacitor.

O dimensionamento do capacitor dependerá da máxima variação percentual de tensão aceitável com relação à tensão de pico do enrolamento de *tap* ($\Delta V_{\%}$) a ser definida. No entanto, deve-se notar que a inclusão de C_s cria uma corrente circulante através do enrolamento de *tap*. Desta forma, há um compromisso entre o máximo acréscimo de tensão aceitável e a corrente circulante. De modo a balancear estes dois parâmetros, os valores para $\Delta V_{\%}$ devem estar entre 10% e 30%.

Igualando (7) e (10), substituindo (11) em (10) e isolando C_s , tem-se que o valor do capacitor é dado por:

$$C_s = L_{tap} (I_{overlap})^2 / \left[\Delta V_c^2 + 2 \left(\sqrt{2} V_{tap} \right) \Delta V_c \right] \quad (12)$$

4 Projeto do Sistema de Proteção

De modo a exemplificar o emprego do sistema de proteção proposto, é apresentado um exemplo de aplicação para a topologia apresentada na Figura 1.

4.1 Especificação do transformador

Neste trabalho, o projeto do sistema de proteção é realizado para um comutador eletrônico de *taps* empregado em um transformador de distribuição monofásico com retorno por terra (MRT) de 5 kVA, 60 Hz, 15 kV de classe de isolamento, com tensões primárias de 7967/7621/7274/6928/6581 V, e tensões secundárias de 440/220 V. O objetivo do referido comutador eletrônico de *taps* é regular a tensão secundária dentro da faixa de 202 V a 231 V, no caso da rede de 220 V, e entre 405 V a 462 V, para a rede de 440 V, de acordo com normativa vigente (ANEEL, 2016).

As relações de transformação são apresentadas na Tabela 1 e os parâmetros do modelo T equivalente são apresentados na Tabela II. Para emprego do mé-

todo de projeto apresentado na sessão anterior, define-se: $S = 5 \text{ kVA}$, $V_{pri} = 7967 \text{ V}$ e $V_{sec} = 220 \text{ V}$.

4.2 Definição das chaves semicondutoras

Substituindo os valores em (1) e (2), verifica-se que os requisitos das chaves semicondutoras devem ser superiores a $I_{S5} = 1,075 \text{ A}$ e $V_{S1} = 2,37 \text{ kV}$. Neste caso, as chaves semicondutoras empregadas são os IGBTs IXGH10N300, cujas características são: 10 A/3 kV e atendem às condições supracitadas. Além disso, a corrente de pico não repetitiva representa uma margem de segurança tanto na operação em sobrecarga, quando na necessidade de migração para o sistema PSS. Apesar das perdas sobre as chaves eletrônicas serem maiores nesses dois últimos casos, a margem de segurança evita o sobredimensionamento das mesmas.

4.3 Projeto do CPPCC

Substituindo valores em (3), verifica-se que o CPPCC deve ter corrente de operação maior que $I_{p,cc} = 25,1 \text{ A}$ e tensão superior a $V_{S1} = 2,37 \text{ kV}$.

4.4 Projeto do circuito de PSS

Para o projeto dos tiristores do PSS, verifica-se que a corrente I_{S5} com uma margem de 20% é igual a $1,29 \text{ A}$ e $I_{p,cc} = 25,1 \text{ A}$. Além disso, de (4) tem-se que $V_{PP} = 1,96 \text{ kV}$. Com isso, pode-se empregar os tiristores CS20-25moT1, que apresentam como características: 18 A/2,5 kV e corrente de surto de 200 A . Os demais dispositivos empregados no circuito da Figura 3 são sumarizados na Tabela 3.

4.5 Projeto do circuito de PDA

A proteção contra descargas atmosféricas no lado secundário do transformador depende dos níveis de tensão de operação do equipamento. Em vista disso, dispositivos ABB OVR.T1+2.15.255/7 podem ser usados para a proteção de modo comum, e dispositivos ABB OVR T1+25/440/50 e OVR T2.15.440P na proteção diferencial contra descargas atmosféricas.

No circuito primário, a proteção diferencial da PDA deve operar para valores de tensão superiores a $V_{PP} = 1,38 \text{ kVrms}$, obtida por (4). Desta forma, podem ser aplicados dispositivos MOV modelo V172BB60.

Para a proteção de modo comum, os dispositivos empregados devem ter tensões de operação superiores a $V_P = 4,67 \text{ kVrms}$ e $V_P = 3,98 \text{ kVrms}$ cujos valores são obtidos a partir de (5) e (6). Sendo assim, podem ser utilizados dispositivos como o ABB POLIM-D 04-01.

4.6 Projeto do circuito de PST

Para projeto da PST consideram-se os seguintes parâmetros obtidos a partir de (8), (9), (11) e (12): $L_{tap} = 8,7 \text{ mH}$, $\Delta t = 10 \mu\text{s}$, $V_{tap} = 419,5 \text{ V}$, $\Delta V\% = 10\%$ e $I_{overlap} = 0,68 \text{ A}$. Com isso, o valor do capacitor é $C_s = 54,7 \text{ nF}$ (56 nF para valores comerciais).

Tabela 1. Relações de transformação dos enrolamentos.

Terminais	Enrolamento	Relação de transformação
$X_1 - X_2$	Secundário	$N_{sec} = 1$
$H_1 - H_2$	Primário	$N_{total} = 36.21$
$T_1 - T_2, T_2 - T_3$ $T_4 - T_5, T_5 - T_6$	Tap	$N_{tap} = 1.575$

Tabela 2. Parâmetros do modelo T equivalente.

Impedância	Valor	Impedância	Valor
R_{pri}	139.59Ω	L_{pri}	200.16 mH
R_{sec}	$106.45 \text{ m}\Omega$	L_{sec}	$152.65 \mu\text{H}$
R_{tap}	6.07Ω	L_{tap}	8.7 mH
---	---	L_m	662.96 mH

Tabela 3. Dispositivos do PSS.

Nomenclatura	Características	Modelo
T_{h1} e T_{h2}	$2,5 \text{ kV}, 18 \text{ A}$	CS 20-25 MOF1
BOD	2400 V	IXBOD1-24R(D)
R_1, R_2, C_2	$200\Omega, 470\Omega, 47\text{nF}$	-
R_3, C_3	$100 \text{ k}\Omega, 470\text{nF}$	-
D_1	$2 \times 1800 \text{ V}$	DHH55-36N1F
D_2, D_3	30 V	-

5 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos para o comutador eletrônico de *taps* do transformador apresentado na sessão anterior, o qual é apresentado na Figura 4. Os ensaios foram feitos para a condição de tensão primária nominal e carga de $4,8 \text{ kW}$ conectada ao secundário do transformador.

Na Figura 5 é apresentada a tensão sobre a chave S_5 quando há uma comutação da chave S_5 para S_4 , considerando uma carga com fator de potência (FP) de $0,91$. É possível verificar que a corrente resultante do processo de comutação eleva a tensão sobre a chave S_5 ; porém, essa elevação é limitada pela PST. Pode-se verificar que a resistência do enrolamento de *tap* é suficiente para amortecer a oscilação do tanque ressonante formado por L_{tap} e C_s .

A Figura 6 apresenta a operação da PSS para proteção de sobrecorrente. Neste caso, o sistema inicialmente opera com tensão primária nominal e potência secundária de $4,1 \text{ kW}$, quando a chave S_1 encontra-se acionada. A carga é então aumentada para $16,4 \text{ kW}$, e, quando o nível de corrente primária atinge 20% do valor nominal, a proteção de sobrecorrente da PSS atua, desviando a corrente da chave S_1 (i_{S1}) para a PSS (i_{PSS}). A comutação da chave S_1 para a PSS representa o pior caso para corrente de sobreposição, uma vez que a tensão envolvida é quatro vezes a tensão de *tap* que ocorre em comutações normais. Apesar da corrente de sobreposição ser maior que a definida por $I_{overlap}$, a PST limita a tensão que aparece sobre a chave S_1 (v_{S1}), que é aberta neste caso.

A Figura 7 apresenta o comutador eletrônico inicialmente operando na chave S_5 com potência de $4,2 \text{ kW}$. Para o ensaio da proteção por sobretensão, a

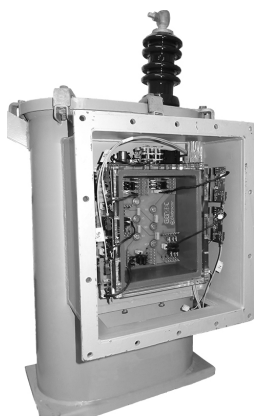


Figura 4. Transformador com comutador eletrônico de taps.

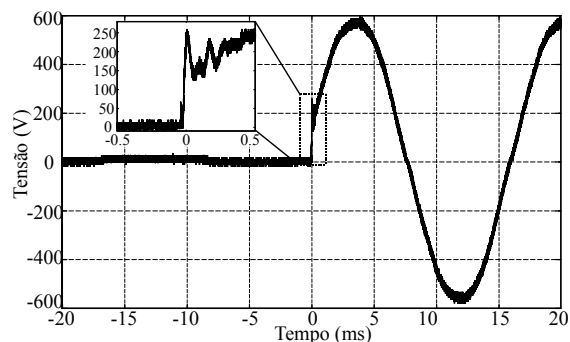


Figura 5. Validação da PST: tensão sobre a chave S_5 durante comutação da chave S_5 para S_4 considerando $PF = 0,91$.

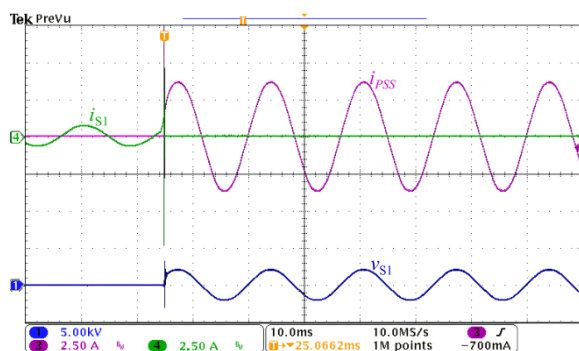


Figura 6. Proteção de sobrecorrente da PSS. i_{S1} – corrente através de S_1 , i_{PSS} – corrente através da PSS, v_{S1} – tensão sobre S_1 .

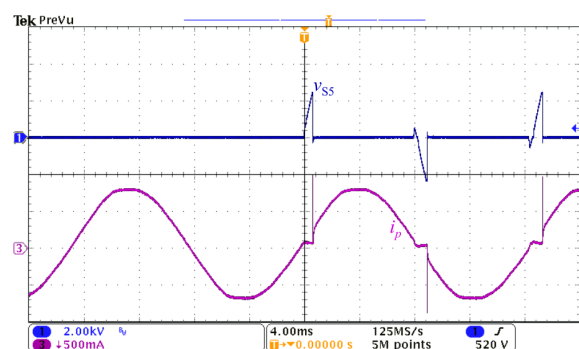


Figura 7. Proteção de sobretensão da PSS. i_p – corrente primária, v_{S5} – tensão sobre a chave S_5 .

chave S_5 é subitamente desligada, deixando o circuito primário do transformador aberto. Quando a tensão sobre a chave S_5 (v_{S5}) atinge a tensão do BOD, (2,4 kV neste caso), a PSS automaticamente aciona os tiristores, prevenindo que as chaves eletrônicas

sejam danificadas. O efeito da operação da PSS pode ser verificado na corrente primária (i_p).

Conclusões

O emprego de comutadores eletrônicos de taps depende de sistemas de proteção capazes de resguardar as chaves eletrônicas contra faltas ocorridas nas redes elétricas de distribuição. O presente trabalho apresentou uma topologia de proteção para chaves eletrônicas contra eventos de sobrecorrente, sobretensão, curtos-circuitos no secundário do transformador e descargas atmosféricas na rede.

Os resultados experimentais demonstram adequada operação dos circuitos de proteção. No entanto, estudos adicionais quanto à operação da PDA são necessários de modo a garantir a adequada operação do equipamento em redes de distribuição.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)”, “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)” e “Centrais Elétricas de Carazinho S/A” pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

- Kezunovic, M; McCalley, J. D e Overbye, T. J (2012). Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems. Proceedings of the IEEE, v. 100, n. Special Centennial Issue, p. 1329-1341.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2016). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasil, p. 76. Disponível online: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>.
- Faiz, J. e Siahkollah, B (2011). Electronic tap-changer for distribution transformers. Springer, p. 184.
- García, S.M; Rodríguez, J.C.C; Jardini, J.A; López, J.V; Segura, A.I. e Cid, P.M.M (2009). Feasibility of electronic tap-changing stabilizers for medium voltage lines – Precedents and new configurations. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, pp. 1490–1503.
- Amin, S.M. e Wollenberg, B.F (2005). Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. IEEE Power and Energy Mag., vol. 3, no. 5, pp. 34-41.
- Bauer, P. e de Haan, S. W. H (1997). Protective device for electronic tap-changer for distribution transformers. EPE97, pp. 4/282 – 4/287.
- Bauer, P. e de Haan S. W. H (1998). Electronic tap changer for 500 kVA/10kV distribution transformers: Design, experimental results and impact on distribution networks. in Proc. Conf. Rec. IEEE Ind. Appl., pp. 1530–1537.