

쇄교자속비를 이용한 3권선 변압기 보호 알고리즘

강용철 · 이병은 · 김은숙 · 원성호 · 임의재
 전북대학교 전자정보 공학부, 차세대전력기술연구센터

A Three-Winding Transformer Protective Relaying Algorithm
 Based on Flux Linkages Ratio

Y.C. Kang, B.E Lee, E.S. Jin*, S.H Won, U.J. Lim
 Chonbuk National University, NPT Center

Abstract - This paper proposes a tree-winding transformer protective relaying algorithm based on the ratio of increment of flux linkages (RIFL). The RIFL of the two windings is equal to the turns ratio for all operating conditions except an internal faults. For a single-phase transformer and three-phase transformer containing the wye-connected windings, the increments of flux linkages are calculated. For a three-phase transformer containing the delta-connected windings, the difference of the increments of flux linkages between the two phases are calculated using the line currents, because the winding currents are practically unavailable. Their ratios are compared with the turns ratio. The results of various tests show that the algorithm successfully discriminates internal faults from normal operation conditions such as magnetic inrush, overexcitation and external faults. The algorithm can not only detect internal winding faults, but reduce the operating time of a relay.

1. 서 론

2권선 변압기뿐만 아니라 3권선 변압기 보호 계전기에도 내부사고와 내부사고가 아닌 것(여자돌입, 과여자, 외부사고)을 구분해야 하며, 변압기 보호에는 전류차동 방식이 주로 사용되고 있다. 하지만, 여자돌입과 과여자시에 차전류가 발생되므로 전류차동 계전기는 오동작할 수 있으며, 이를 방지하기 위하여 고조파를 사용하고 있다[1-3]. 이 방식들은 모든 고조파 성분을 사용하거나 [1], 2조파를 이용하거나[2], 2조파와 5조파를 결합하여[3] 억제 또는 블로킹하는데, 내부사고시 계전기 동작이 지연되는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해서, 변압기 모델에 기초한 방식들이 제안되었다[4-6]. 이들은 시간영역에서 동작하기 때문에 동작속도가 매우 빠르다. 하지만, [4]의 방식을 3권선 변압기로 확장하는 경우에는, 델타 권선전류의 순환 성분을 추정하는 별도의 방법이 필요하다.

참고문헌 [5, 6]에서는 유기 전압비가 여자돌입, 과여자시에는 권선비와 같은 반면에, 내부사고시에는 권선비와 같지 않은 원리를 이용하였다. 하지만, 이 방식들은 미분항을 근사하는 과정에서 수치 오차가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 쇄교자속 증분비가 내부사고시에는 권선비와 같지 않고, 여자돌입, 과여자시에는 권선비와 같은 원리를 사용하는 변압기 보호 방식에 대해서 기술한다. 참고문헌 [5,6]에서는 미분을 사용한 반면, 제안한 방식은 적분을 사용하기 때문에, 수치 오차가 적다. 여자돌입, 내부사고, 과여자, 외부사고 등의 경우에서 제안한 방식의 성능을 시험하였다.

2. 쇄교자속비를 이용한 3권선 변압기 보호 알고리즘

2.1 3권선 단상 변압기

그림 1은 3권선 단상 변압기를 나타낸다. 내부사고가 없다면, 각 권선의 단자 전압은 다음과 같다.

$$v_1 = R_1 i_1 + L_n \frac{di_1}{dt} + \frac{d\lambda_1}{dt} \tag{1}$$

$$v_2 = -R_2 i_2 - L_e \frac{di_2}{dt} + \frac{d\lambda_2}{dt} \tag{2}$$

$$v_3 = -R_3 i_3 - L_s \frac{di_3}{dt} + \frac{d\lambda_3}{dt} \tag{3}$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 각각 1차, 2차, 3차 쇄교자속이다.

식(1), (2), (3)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = v_1 - R_1 i_1 - L_n \frac{di_1}{dt} \tag{4}$$

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = v_2 + R_2 i_2 + L_e \frac{di_2}{dt} \tag{5}$$

$$\frac{d\lambda_3}{dt} = v_3 + R_3 i_3 + L_s \frac{di_3}{dt} \tag{6}$$

쇄교자속의 증분 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$ 는 식 (4)~(6)의 우변을 적분하여 계산하고, 두 권선간의 쇄교자속의 증분비를 식 (7)과 같이 정의한다.

$$RIFL12 \equiv \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2}, RIFL13 \equiv \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_3} \tag{7}$$

정상상태에서는 여자돌입, 과여자의 경우 RIFL12와 RIFL13은 각각 권선비 $N_1/N_2, N_1/N_3$ 과 같은 반면, 내부사고시에는 권선비와 같지 않다.

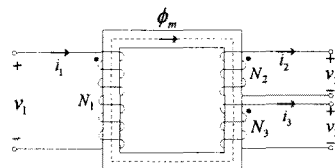


그림 1 3권선 단상 변압기

그런데 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$ 가 순시값이므로 0을 지나는 순간에는 쇄교자속의 증분비가 권선비와 같지 않다. 따라서 본 논문에서는 식 (7)의 쇄교자속 증분비 대신, 식 (8)과 (9)의 디텍터를 사용하여 변압기를 보호하고자 한다. 즉, 식 (8)과 (9)로부터 계산한 디텍터의 값이 0 이면 내부사고가 아니고, 0이 아니면 내부사고로 판단한다. 디텍터의 값의 의미는 추정한 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$ 의 차를 백분율로 표현한 것이다.

$$Detector12 = \frac{\Delta\lambda_1 - \frac{N_1}{N_2} \Delta\lambda_2}{\sqrt{2} V_1 \cdot T} \times 100(\%) \quad (8)$$

$$Detector13 = \frac{\Delta\lambda_1 - \frac{N_1}{N_3} \Delta\lambda_3}{\sqrt{2} V_1 \cdot T} \times 100(\%) \quad (9)$$

2.2 3권선 3상 Y-Y- Δ 변압기

그림 2에 3권선 3상 Y-Y- Δ 변압기를 나타내었다. 각 권선의 전압은 식 (10)~(18)로 나타낸다.

$$v_{1A} = R_{1A}i_{1A} + L_{1A} \frac{di_{1A}}{dt} + \frac{d\lambda_{1A}}{dt} \quad (10)$$

$$v_{1B} = R_{1B}i_{1B} + L_{1B} \frac{di_{1B}}{dt} + \frac{d\lambda_{1B}}{dt} \quad (11)$$

$$v_{1C} = R_{1C}i_{1C} + L_{1C} \frac{di_{1C}}{dt} + \frac{d\lambda_{1C}}{dt} \quad (12)$$

$$v_{2A} = -R_{2A}i_{2A} - L_{2A} \frac{di_{2A}}{dt} + \frac{d\lambda_{2A}}{dt} \quad (13)$$

$$v_{2B} = -R_{2B}i_{2B} - L_{2B} \frac{di_{2B}}{dt} + \frac{d\lambda_{2B}}{dt} \quad (14)$$

$$v_{2C} = -R_{2C}i_{2C} - L_{2C} \frac{di_{2C}}{dt} + \frac{d\lambda_{2C}}{dt} \quad (15)$$

$$v_{3AB} = R_{3AB}i_{3AB} + L_{3AB} \frac{di_{3AB}}{dt} + \frac{d\lambda_{3AB}}{dt} \quad (16)$$

$$v_{3BC} = R_{3BC}i_{3BC} + L_{3BC} \frac{di_{3BC}}{dt} + \frac{d\lambda_{3BC}}{dt} \quad (17)$$

$$v_{3CA} = R_{3CA}i_{3CA} + L_{3CA} \frac{di_{3CA}}{dt} + \frac{d\lambda_{3CA}}{dt} \quad (18)$$

Y 결선에 해당하는 쇄교자속의 증분 $\Delta\lambda_{1A}, \Delta\lambda_{1B}, \Delta\lambda_{1C}$ 과 $\Delta\lambda_{2A}, \Delta\lambda_{2B}, \Delta\lambda_{2C}$ 는 식 (10)~(15)로부터 직접 계산 가능하다.

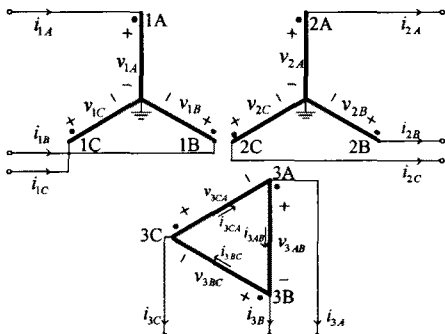


그림 2 3권선 3상 Y-Y- Δ 변압기

반면에, Δ 결선에 해당하는 $\Delta\lambda_{3AB}, \Delta\lambda_{3BC}, \Delta\lambda_{3CA}$ 는 권선전류인 $i_{3AB}, i_{3BC}, i_{3CA}$ 를 측정하기 어렵기 때문에, 식 (16)~(18)로부터 직접 계산이 어렵다.

그런데 i_{3A}, i_{3B}, i_{3C} 는 측정 가능하기 때문에 본 논문에서는 이를 이용하기 위해서 선전류와 권선전류간의 관계 식 (19)를 이용한다.

$$i_{3CA} - i_{3AB} = i_{3A}, \quad i_{3AB} - i_{3BC} = i_{3B}, \quad i_{3BC} - i_{3CA} = i_{3C} \quad (19)$$

또한, 내부사고가 발생하지 않으면 식 (20)이 성립한다.

$$R_{3AB} \approx R_{3BC} \approx R_{3CA} = R, \quad L_{3AB} \approx L_{3BC} \approx L_{3CA} = L_l \quad (20)$$

식 (18)에서 식 (16)을, 식 (16)에서 식 (17)을, 식 (17)에서 식 (18)을 각각 빼서 정리하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\lambda_{3CA}}{dt} - \frac{d\lambda_{3AB}}{dt} = v_{3CA} - v_{3AB} - Ri_{3A} - L_l \frac{di_{3A}}{dt} \quad (21)$$

$$\frac{d\lambda_{3AB}}{dt} - \frac{d\lambda_{3BC}}{dt} = v_{3AB} - v_{3BC} - Ri_{3B} - L_l \frac{di_{3B}}{dt} \quad (22)$$

$$\frac{d\lambda_{3BC}}{dt} - \frac{d\lambda_{3CA}}{dt} = v_{3BC} - v_{3CA} - Ri_{3C} - L_l \frac{di_{3C}}{dt} \quad (23)$$

$\Delta\lambda_{3AB}, \Delta\lambda_{3BC}, \Delta\lambda_{3CA}$ 를 계산할 수 없지만, 그들의 차는 식 (21)~(23)을 통해서 계산 가능하다. 이와 대응하는 1차 권선의 식은 식 (10)~(12)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \frac{d\lambda_{1C}}{dt} - \frac{d\lambda_{1A}}{dt} \\ &= v_{1C} - v_{1A} - (R_{1C}i_{1C} - R_{1A}i_{1A}) - (L_{1C} \frac{di_{1C}}{dt} - L_{1A} \frac{di_{1A}}{dt}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d\lambda_{1A}}{dt} - \frac{d\lambda_{1B}}{dt} \\ &= v_{1A} - v_{1B} - (R_{1A}i_{1A} - R_{1B}i_{1B}) - (L_{1A} \frac{di_{1A}}{dt} - L_{1B} \frac{di_{1B}}{dt}) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d\lambda_{1B}}{dt} - \frac{d\lambda_{1C}}{dt} \\ &= v_{1B} - v_{1C} - (R_{1B}i_{1B} - R_{1C}i_{1C}) - (L_{1B} \frac{di_{1B}}{dt} - L_{1C} \frac{di_{1C}}{dt}) \end{aligned} \quad (26)$$

한편, Y-Y- Δ 변압기의 경우에, 1차 권선과 2차 권선 사이에는 식 (27)이, 1차 권선과 3차 권선의 사이에는 식 (28)이 성립한다.

$$\frac{\Delta\lambda_{1A}}{\Delta\lambda_{2A}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{\Delta\lambda_{1B}}{\Delta\lambda_{2B}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{\Delta\lambda_{1C}}{\Delta\lambda_{2C}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (27)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{1A}}{\Delta\lambda_{3AB}} = \frac{N_1}{N_3}, \quad \frac{\Delta\lambda_{1B}}{\Delta\lambda_{3BC}} = \frac{N_1}{N_3}, \quad \frac{\Delta\lambda_{1C}}{\Delta\lambda_{3CA}} = \frac{N_1}{N_3} \quad (28)$$

$\Delta\lambda_{1A}, \Delta\lambda_{1B}, \Delta\lambda_{1C}, \Delta\lambda_{2A}, \Delta\lambda_{2B}, \Delta\lambda_{2C}$ 는 계산이 가능하지만, $\Delta\lambda_{3AB}, \Delta\lambda_{3BC}, \Delta\lambda_{3CA}$ 는 계산 불가능하기 때문에, 식 (28)은 디텍터에 직접 적용이 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 식 (28) 대신에 식 (29)를 사용하여 디텍터를 구하였다. 식 (28), (29)는 필요충분 조건이다.

$$\frac{\Delta\lambda_{1C} - \Delta\lambda_{1A}}{\Delta\lambda_{3CA} - \Delta\lambda_{3AB}} = \frac{N_1}{N_3}, \quad \frac{\Delta\lambda_{1A} - \Delta\lambda_{1B}}{\Delta\lambda_{3AB} - \Delta\lambda_{3BC}} = \frac{N_1}{N_3}, \quad \frac{\Delta\lambda_{1B} - \Delta\lambda_{1C}}{\Delta\lambda_{3BC} - \Delta\lambda_{3CA}} = \frac{N_1}{N_3} \quad (29)$$

따라서, 디텍터는 다음과 같이 주어진다.

$$Detector1 = \frac{\Delta\lambda_{1A} - \frac{N_1}{N_2} \Delta\lambda_{2A}}{\sqrt{2} V_{1A} \cdot T} \times 100(\%) \quad (30)$$

$$Detector2 = \frac{\Delta\lambda_{1B} - \frac{N_1}{N_2} \Delta\lambda_{2B}}{\sqrt{2} V_{1B} \cdot T} \times 100(\%) \quad (31)$$

$$Detector3 = \frac{\Delta\lambda_{1C} - \frac{N_1}{N_2} \Delta\lambda_{2C}}{\sqrt{2} V_{1C} \cdot T} \times 100(\%) \quad (32)$$

$$Detector4 = \frac{\Delta(\lambda_{1C} - \lambda_{1A}) - \frac{N_1}{N_2} \Delta(\lambda_{3CA} - \lambda_{3AB})}{\sqrt{2} V_{1CA} \cdot T} \times 100(\%) \quad (33)$$

$$Detector5 = \frac{\Delta(\lambda_{1A} - \lambda_{1B}) - \frac{N_1}{N_3} \Delta(\lambda_{3AB} - \lambda_{3BC})}{\sqrt{2} V_{1AB} \cdot T} \times 100(\%) \quad (34)$$

$$Detector6 = \frac{\Delta(\lambda_{1B} - \lambda_{1C}) - \frac{N_1}{N_3} \Delta(\lambda_{3BC} - \lambda_{3CA})}{\sqrt{2} V_{1BC} \cdot T} \times 100(\%) \quad (35)$$

3. 사례연구

그림 3은 모델 계통을 나타낸다. 3상 3권선 Y-Y-Δ 변압기(345kV/154kV/23kV, 500MVA)를 EMTP를 이용하여 모델링하였다. 내부사고 데이터는 [7]의 모델링 방법을 사용해서 생성하였다.

샘플링 비율은 주기당 32샘플을 사용하였고, 저역 통과 필터는 저지대역 컷오프 주파수가 960 Hz인 2차 Butterworth 필터를 설계하여, 모든 전압과 전류를 통과시켰다.

변압기 철심의 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 type-96 소자를 사용하였고, HYSDAT을 사용하기 위한 포화점은 (100A, 822V)을 사용하였다.

식 (10)~(18)에 있는 미분항을 적분하는데, 사다리꼴 방식으로 근사화하였다.

디텍터의 임계값은 수치 오차와 계전의 감도 등에 따라 결정된다. 본 논문에서는 5%를 사용하였고, 과도 신호에 의한 오동작을 방지하기 위하여 카운터를 사용하였다. 만약 디텍터가 5%보다 크면, 카운터를 1 증가시키고, 작으면 1을 감소시킨다. 또한, 카운터가 0보다 작으면 0으로 한다. 카운터가 4를 초과하게 되면 트립신호를 발생시킨다.

제한한 방식을 여자돌입, 내부사고, 과여자, 외부사고인 경우에 대해서 성능을 시험하였으며, 사례연구에서는 Detector만을 나타내었다.

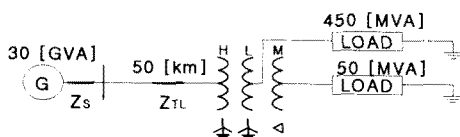


그림 3 모델 계통

3.1 여자돌입

그림 4는 무부하, 투입 위상각 0도, 잔류자속 80%인 경우의 디텍터와 트립신호를 나타내었다. Trip1신호는 Detector1~3의 결과로부터 발생되고, Trip2신호는 Detector4~6의 결과로부터 발생된다. 모든 디텍터가 5%이내이므로, Trip1신호와 Trip2신호는 발생되지 않았다.

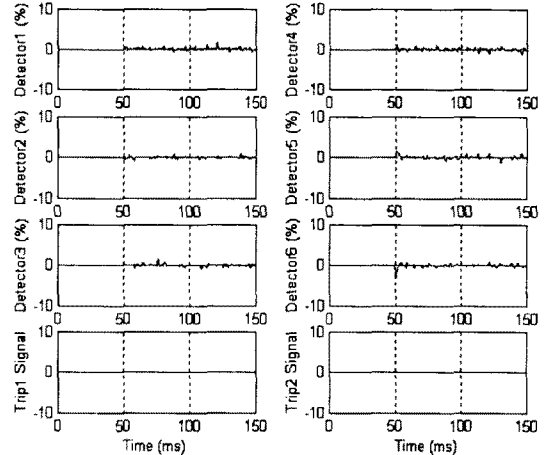


그림 4 디텍터와 트립신호(여자돌입)

3.2 내부사고

그림 5는 1차 권선의 A상에 중성점으로부터 60%의 지점에서 0도 지락사고 발생시의 디텍터와 트립신호를 나타내었다. 1차 권선 A상 사고이므로, Detector1, 4, 5만 임계값을 넘는다. 또한, 사고 발생이후 2.9ms에 Trip1신호와 Trip2신호가 발생되었다.

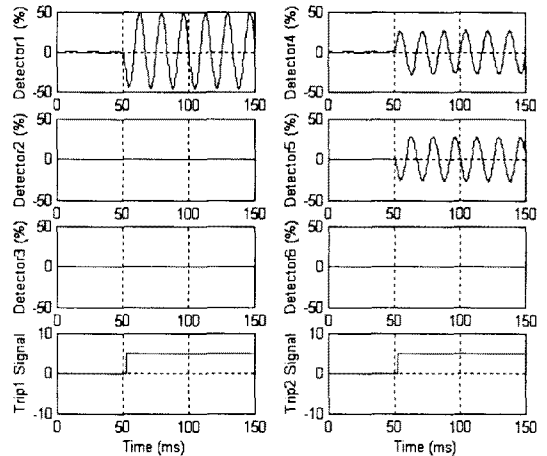


그림 5 디텍터와 트립신호(내부사고)

3.3 과여자

그림 6은 1차 권선에 정격전압의 150%를 인가한 과여자인 경우의 디텍터와 트립신호를 나타내었다. 모든 디텍터가 5%이내이므로, Trip1신호와 Trip2신호는 발생되지 않았다.

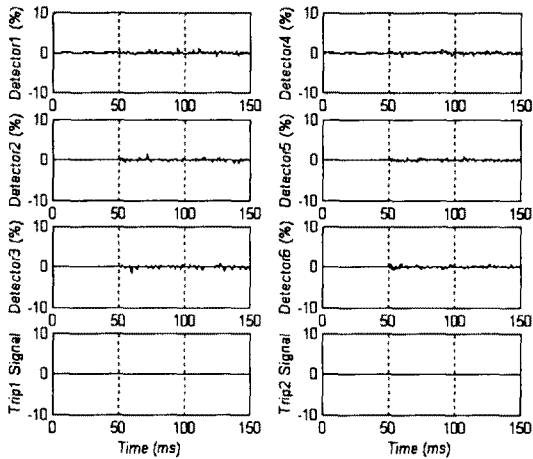


그림 6 디텍터와 트립신호 (과여자)

3.4 외부사고

그림 7은 2차측 부하 선간 단락사고가 발생한 경우의 디텍터와 트립신호를 나타내었다. 이 경우도 내부사고 아니기 때문에 디텍터가 모두 5%내이므로, Trip1신호와 Trip2신호는 발생되지 않았다.

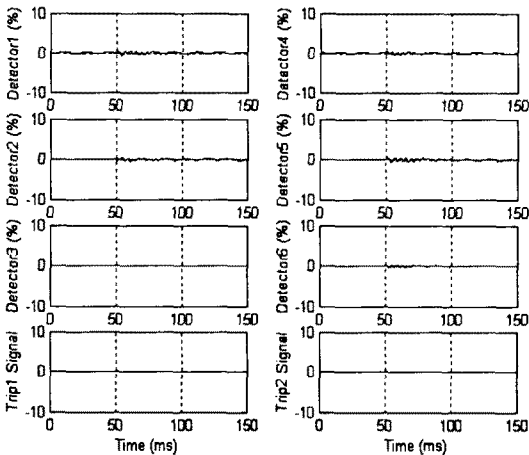


그림 7 디텍터와 트립신호 (외부사고)

4. 결 론

본 논문에서는 쇄교자속비를 이용한 3권선 변압기 보호 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 적분 근사 방법을 사용하기 때문에 미분 근사 방식에 비해 수치 오차가 적다. 또한, 여자돌입과 과여자시, 매우 왜곡된 전압, 전류로부터 쇄교자속 증분비를 정확하게 계산하므로, 내부사고를 여자돌입, 과여자와 정확하게 구분하였으며, 외부사고에도 오동작하지 않았다.

제안한 방식은 복잡한 히스테리시스 데이터를 사용하지 않으며, 시간 영역에서 동작하므로 동작속도가 빠르다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. D. Hayward, "Harmonic-Current-Restrained Relays for Transformer Differential Protection," *AIEE Trans*-60, pp. 377-382, 1941.
- [2] R. L. Sharp, and W. E. Glassburn, "A Transformer Differential Relay with Second-Harmonic Restraint," *AIEE Trans. Part III-77*, pp. 913-918, 1958
- [3] C. H. Einvall, and J. R. Linders, "A Three-phase Differential Relay for Transformer Protection," *IEEE Trans. on PAS-94*, no. 6, pp. 1971-1980, Nov./Dec. 1975
- [4] M. S. Sachdev, T. S. Sidhu and H. C. Wood, "A Digital Relaying Algorithm for Detection Transformer Winding Faults," *IEEE Trans. PWRD-4*, no. 3, pp. 1638-1648, Jul. 1989.
- [5] 강용철, 이병은, "유기 전압비를 이용한 변압기 보호계전 알고리즘," *전기학회 논문지 A*, 제49권 제10호, pp. 524-530, 2000년 10월.
- [6] Y. C. Kang and B. E. Lee, "A Transformer Protection Relay Based on Induced Voltages," *KIEE Trans. on PE*, vol. 3-A, no. 2, pp. 70-78, Jun. 2003.
- [7] P. Bastard, P. Bertrand, and M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies," *IEEE Trans. on PWRD*, vol.9, no.2, pp. 690-699, April 1994