

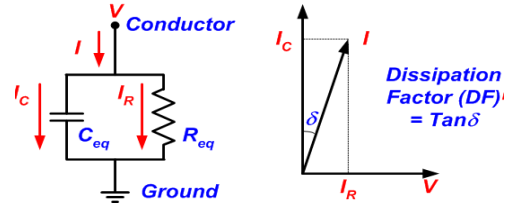
## 절연 누설 전류 측정을 이용한 운전 중인 교류 전동기의 고장자 절연 상태 진단

조진태 · 이상빈  
고려대학교 전기공학부

### An On-line Insulation Quality Assessment for AC Machine Stator Windings based on Differential Leakage Current Measurement

Jintae Cho · Sang Bin Lee  
Department of Electrical Engineering , Korea University

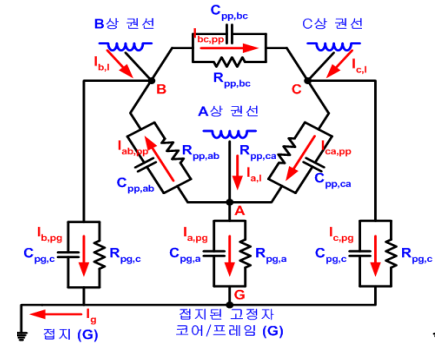
**Abstract** - 본 논문은 3상 교류기기 고장자 권선의 주절연과 상간 절연의 절연 상태 진단에 대한 연구이다. 각 상의 차동 누설 전류 측정을 이용하여 교류기기의 운전 중에 절연 상태를 나타내는 인자인 커패시턴스와 Dissipation Factor( $\tan\delta$ )를 계산한다. 이를 위해 오프라인과 온라인 테스트를 위한 3상 절연 시스템 모델을 유도하고, 알고리즘을 통해 각 상의 고장자 권선의 주절연과 상간 절연의 상태를 나타내는 인자를 정량화한다. 15hp의 유도 전동기를 이용하여 주절연과 상간 절연의 고의적인 열화 아래 실험을 하였다.



#### 1. 서론

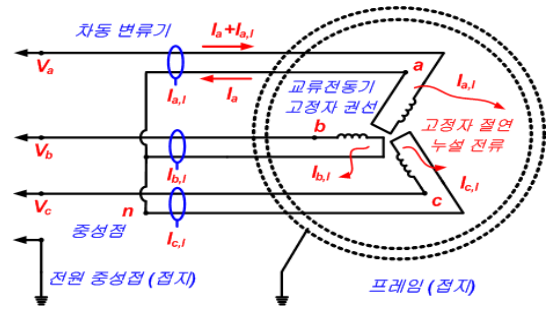
<그림 1> 절연체의 기본적인 등가 회로 모델

IEEE, Allianz 등에서 발표한 전기기기 신뢰도 조사에서 볼 수 있듯이, 고장자 절연 이상으로 인한 전동기 고장이 전기기기 고장의 30~40%이고, 발전기나 큰 모터와 같은 고압기기의 경우 60~70%에 달하여 고장자 절연이 전기기기의 신뢰성을 확보하기 위한 중요한 요소라는 것을 알 수 있다. 고장자 절연의 파괴로 인한 전기기기의 고장은 보수와 수리에 필요한 비용의 손실, 공정의 정지로 인한 막대한 경제적 손실, 누전과 아크사고로 인한 화재와 인명 피해를 발생시키게 된다. 따라서, 고장자 절연 상태를 정기적으로 정확하게 진단하는 것은 신뢰성 있는 운전을 위해 매우 중요하며, 이를 위해 과거부터 현재까지 고장자 절연의 열화와 파괴를 미리 알 수 있도록 고장자 절연상태를 측정하는 여러 가지 오프라인과 온라인 방법이 발전해오고 있다[1-2].



<그림 2> 3상 절연 시스템 모델

대부분 오프라인 방식은 3~6년에 한 번 정도 하는 정기 점검이므로 절연의 상태를 자주 진단할 수 없다는 단점과 동시에 공장의 정지에 따른 고가의 진단비용이 들게 된다[1-2]. 온라인 절연 상태 진단은 빈도 높게 절연의 상태를 진단하기 때문에 절연 상태에 대한 정확하고 신뢰성 있는 진단이 가능하며 절연의 열화를 조기에 진단함으로써 절연 파괴에 의한 피해를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 현재 사용하고 있는 대부분의 온라인 진단법은 고가이며, 절연 상태의 정확하고 신뢰성 있는 진단에 어려움이 있다[1-2]. 따라서 고장자 권선의 절연 상태를 정확하고 신뢰성 있게 진단할 수 있는 저가의 방법이 요구된다.



<그림 3> 온라인 차동 누설 전류 측정 개략도

#### 2. 본론

##### 2.1 차동 누설 전류 측정을 이용한 온라인 진단법

절연체는 일반적으로 그림 1에 보인 것과 같이 절연 커패시턴스( $C_{eq}$ )와 절연 저항( $R_{eq}$ )으로 모델링하며, 이를 바탕으로 운전 중인 교류 전동기의 3상 절연 시스템은 그림 2와 같이 모델링 할 수 있다[1-2]. 운전 중인 직립 교류 전동기는 오프라인과 다르게 고장자 권선에 평균적으로 걸리는 전압이 1/2이 되므로[1-2] 3상 절연 시스템을 바탕으로 다음과 같이 각 상의 차동 누설 전류에 대한 관계식을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{a,l} &= \tilde{I}_{a,l,R} + \tilde{I}_{a,l,C} \\ &= (\tilde{V}_{ag}/R_{pp,a} + \tilde{V}_{ab}/R_{pp,ab} + \tilde{V}_{ac}/R_{pp,ca})/2 \\ &\quad + j\omega(\tilde{V}_{ag}C_{pg,a} + \tilde{V}_{ab}C_{pp,ab} + \tilde{V}_{ac}C_{pp,ca})/2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{b,l} &= (\tilde{V}_{bg}/R_{pp,b} + \tilde{V}_{bc}/R_{pp,bc} + \tilde{V}_{ba}/R_{pp,ab})/2 \\ &\quad + j\omega(\tilde{V}_{bg}C_{pg,b} + \tilde{V}_{bc}C_{pp,bc} + \tilde{V}_{ba}C_{pp,ab})/2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{c,l} &= (\tilde{V}_{cg}/R_{pp,c} + \tilde{V}_{ca}/R_{pp,ca} + \tilde{V}_{cb}/R_{pp,bc})/2 \\ &\quad + j\omega(\tilde{V}_{cg}C_{pg,c} + \tilde{V}_{ca}C_{pp,ca} + \tilde{V}_{cb}C_{pp,bc})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

그림 3과 같이 측정한 3상의 차동 누설 전류의 관계식 (1)~(3)으로 각 주절연과 상간 절연 상태를 알아내기 위해서는 각 주절연과 상간 절연인 6개의 절연의 절연 저항과 절연 커패시턴스인 총 12개의 파라미터를 알아내야 절연 상태 인자인 절연 커패시턴스와 DF(Dissipation Factor)를 알 수 있다.

교류 전동기의 고장자 권선의 경우 각 주절연과 상간 절연의 등가 커패시턴스는 고열, 온도 변화 등에 의한 열적 스트레스의 경우 수년 동안 충분한 스트레스를 받아도 1%정도만 떨어진다[3]. 따라서 오프라인 진단법을 통해 열화 되기 이전의 12개의 파라미터를 정확히 알아낸다면, 6개의 절연 커패시턴스는 열화 후에도 온라인에서 이용할 수 있다.

일반적으로 교류 전동기의 고장자 권선의 절연 열화로 인한 고장의 경우 3상의 주절연과 상간 절연 중 하나의 절연이 열화로 인한 고장을 일으킨다. 3상의 차동 누설 전류에 대한 관계식은 3상의 전압이 평행하다고 가정하고, 3상의 상 절연과 상간 절연의 인자가 거의 비슷하다고 가정할 경우, 다음과 같다.

<표 1> 주/상간 절연의 열화로 인한 절연 상태 인자 변화

	Phase A			Phase B			Phase C		
	$R_{eq}$	$C_{eq}$	DF	$R_{eq}$	$C_{eq}$	DF	$R_{eq}$	$C_{eq}$	DF
Uniform Degradation	↓	-	↑	↓	-	↑	↓	-	↑
Decrease in $R_{pg,a}$	↓	-	↑	-	-	-	-	-	-
Decrease in $R_{pg,b}$	-	-	-	↓	-	↑	-	-	-
Decrease in $R_{pg,c}$	-	-	-	-	-	-	↓	-	↑
Decrease in $R_{pp,ab}$	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↓	-	↑
Decrease in $R_{pp,bc}$	-	-	-	↓	↑	↑	↓	↓	↑
Decrease in $R_{pp,ca}$	↓	↓	↑	-	-	-	↓	↑	↑

$$\begin{aligned} \widetilde{I}_{abc,l} &= \widetilde{V}_{abc,g}[(1/R_{pg} + 3/R_{pp}) + j\omega(C_{pg} + 3C_{pp})] \\ &= \widetilde{V}_{abc,g}(R_{eq} + j\omega C_{eq}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$DF = \tan\delta = 1/\omega RC \quad (5)$$

관계식 (4)~(5)를 통해 얻은 각 상당 등가의 절연 저항, 절연 커패시턴스 그리고 DF를 표1과 같이 열화 전과 열화 후의 변화를 통해 열화된 절연을 파악할 수 있다[2].

만약 A상의 주절연 혹은 상간 절연에 열화가 발생하였다면, 열화 전의 각 상당 등가의 절연 저항, 절연 커패시턴스 그리고 DF와 열화 후의 각 상당 등가의 절연 저항, 절연 커패시턴스 그리고 DF와 비교하여 표1을 바탕으로 열화된 주절연 혹은 상간 절연을 파악할 수 있다. 그리고 열화된 절연이 A상의 주절연 혹은 A상과 B상 사이의 상간 절연인 경우 다음과 같은 식으로 열화된 절연의 절연 저항  $R'_{pg,a}$ 와  $R'_{pp,ab}$ 를 계산할 수 있다.

$$\widetilde{I}_{a,l,R} = (\widetilde{V}_{ag}/R'_{pg,a} + \widetilde{V}_{ab}/R_{pp,ab} + \widetilde{V}_{ac}/R_{pp,ca})/2 \quad (6)$$

$$R'_{pg,a} = \widetilde{V}_{ag}/(2\widetilde{I}_{a,l,R} - \widetilde{V}_{ab}/R_{pp,ab} + \widetilde{V}_{ac}/R_{pp,ca}) \quad (7)$$

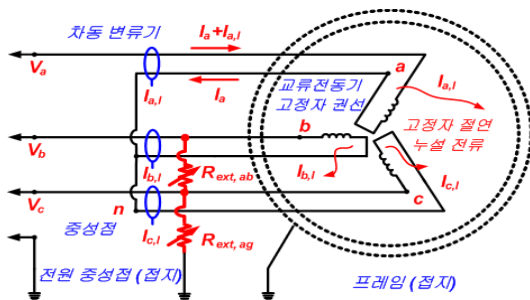
$$R'_{pp,ab} = \widetilde{V}_{ab}/(2\widetilde{I}_{a,l,R} - \widetilde{V}_{ag}/R_{pg,a} + \widetilde{V}_{ac}/R_{pp,ca}) \quad (8)$$

이를 통해 열화가 발생한 A상의 주절연의 절연 저항( $R'_{pg,a}$ ) 또는 상간 절연의 절연 저항( $R'_{pp,ab}$ )값을 정량적으로 파악할 수 있게 된다. 그리고 열화된 절연과 이외의 절연은 오프라인 진단법을 통해 얻어낸 열화 이전의 파라미터를 이용하여 식(5)을 통해 DF를 도출해냄으로써 3상의 주절연과 상간 절연인 6개의 절연에 대한 절연 상태 인자를 정량화할 수 있게 된다. B상이나 C상의 주절연이나 상간 절연이 열화된 경우도 동일한 방법으로 열화된 절연을 파악할 수 있고 절연 인자를 정량화할 수 있다. 이것은 간단한 연산 알고리즘이어서 안정하고 전압의 변동에도 둔감하다.

## 2.2 실험을 통한 유효성 입증

실험은 random wound 고정자를 가진 380-V, 24.3-A, 15-hp의 유도전동기를 사용하였다. IEEE std 286에 나온 오프라인 진단법을 바탕으로 실험을 하였다[4]. 이를 통해서 실험의 기반이 되는 열화되기 전의 각 상의 주절연과 상간 절연의 절연 상태 인자를 표2와 같이 얻을 수 있었다.

운전 중인 교류 전동기의 고정자 권선 절연의 열화가 발생할 경우는 그림 1에 보듯이 절연의 모델링에서 절연 저항 성분이 작아짐을 의미한다. 절연이 열화된 상태에서의 실험을 위해 그림 4와 같이 A상의 주절연 또는 상간 절연에 가변 저항  $R_{ext,ag}$  혹은  $R_{ext,ab}$ 를 병렬로 연결하여 고의적인 절연 열화 상태 아래서 실험을 시행하였다.



<그림 4> 절연 열화 실험을 위한 개략도

<표 2> 오프라인 진단법으로 측정된 절연 상태 인자

$R$ (MΩ)	$R_{pp,a}$	$R_{pp,b}$	$R_{pp,c}$	$R_{pp,ab}$	$R_{pp,bc}$	$R_{pp,ca}$
100.26	106.77	113.60	646.83	464.09	489.05	
$C$ (nF)	$C_{pp,a}$	$C_{pp,b}$	$C_{pp,c}$	$C_{pp,ab}$	$C_{pp,bc}$	$C_{pp,ca}$
1.42	1.38	1.40	0.46	0.48	0.50	
DF (%)	$DF_{pp,a}$	$DF_{pp,b}$	$DF_{pp,c}$	$DF_{pp,ab}$	$DF_{pp,bc}$	$DF_{pp,ca}$
1.87	1.81	1.67	0.89	1.20	1.09	

<표 3> 열화 후 주절연(a)과 상간 절연(b)의 절연 상태 인자

$R_{ext,ag}$ (MΩ)	$R_{pg,ag}$ (MΩ)	DF (%)	$R_{ext,ab}$ (MΩ)	$R_{pp,ab}$ (MΩ)	DF (%)
100	31.24	5.98	100	31.82	18.12
41	16.71	11.18	41	17.09	33.74
33	13.95	13.39	33	14.39	40.07
25	11.07	16.88	25	11.08	52.04
16	7.63	24.48	16	7.79	74.02
8	4.01	46.58	8	4.00	144.16
5	2.66	70.23	5	2.66	216.79
3	1.46	127.95	3	1.45	397.69
1.5	0.76	245.79	1.5	0.76	758.75

(a)

(b)

A상의 상 절연 혹은 상간 절연 중 열화가 발생하였을 때의 각 상당 등가의 절연 저항, 절연 커패시턴스, 그리고 DF를 열화되기 전의 각 상당 등가의 절연 저항, 절연 커패시턴스, 그리고 DF와 비교하여 변화를 확인한 결과 표1을 바탕으로 예상한 열화된 절연을 파악할 수 있었다.

A상의 주절연이 열화된 경우,  $R_{ext,ag}$ 를 그림4와 같이 A상에 병렬로 연결했을 경우와 A상과 B상 사이의 상간 절연이 열화된 경우,  $R_{ext,ab}$ 를 A상과 B상 사이에 그림4와 같이 병렬로 연결하고 각 각 실험한 결과, A상의 열화된 주절연을 식(6)~(7)을 통해 표3의 (a)와 같이 절연 저항값을 얻어낼 수 있었고, 이와 더불어 오프라인 진단을 통해 얻은 A상 주절연의 커패시턴스를 식(5)를 통해 DF를 도출할 수 있었다. 또한, A상의 상간 절연이 열화된 경우 식(5)~(6), (8)로써 표3의 (b)와 같이 절연 상태 인자를 도출하였다.

표3에서 보듯이  $R_{ext}$ 를 100MΩ~1.5MΩ로써 병렬로 연결하여 열화 정도를 조절하면서 실험한 결과, 열화가 적게 진행된 경우도 절연 상태 인자를 정량화하여 조기 진단할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 열화 이전의 오프라인 진단을 통해 얻어낸 파라미터를 통해 최종적으로 3상의 주절연과 상간 절연의 절연 상태 인자를 정량화할 수 있었다. B상과 C상의 주절연 혹은 상간 절연이 열화된 경우도 같은 방법을 통해 열화된 절연의 절연 상태 인자를 도출해 낼 수 있을 것이다.

## 3. 결 론

본문에서 제안한 온라인 절연 진단법은 차동 누설 전류 측정을 이용한 운전 중인 직립 기동 교류 전동기 고정자 권선의 주절연 및 상간 절연상태를 정량적으로 파악하는 진단법이다. 이 진단법은 선정된 변류기의 성능과 연산의 불량조건을 감안하여 알고리즘을 간단하고 안정적으로 구현하였다. 이를 통해 교류 전동기의 3상의 주절연과 상간 절연의 절연 상태를 정량적으로 파악할 수 있게 되었다. 성능이 향상된 변류기의 개발과 실제 열화를 통한 임증이 이루어진다면 절연의 열화를 조기 진단함으로써 절연 파괴로 인한 손실을 예방할 수 있을 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] S. B. Lee, K. Younsi, G. B. Kliman, "An On-line technique for monitoring the insulation condition of AC machine stator windings", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, pp. 737-745, 2005
- [2] S. B. Lee, J. Yang, K. Younsi, R. Bharadwaj, "An On-line Groundwall and Phase to Phase Insulation Quality Assessment Technique for AC Machine Stator Windings", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 42, no. 4, pp. 946-957, 2006
- [3] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines, ser. IEEE Press Series on Power Engineering. New York: Wiley, 2004
- [4] IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation, IEEE Std.286-2000, 2000