

인버터 서지와 온도 스트레스 하에서 Magnet Wire 절연 수명평가

박재준^a

중부대학교 전기전자공학과

Insulation Life Estimation for Magnet Wire Under Inverter Surge and Temperature Stress

Jae-Jun Park^a

Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Goyang 32713, Korea

(Received September 19, 2016; Revised September 24, 2016; Accepted September 24, 2016)

Abstract: Coil specimen was prepared by coating a copper wire with two varnish thin layers: the first was polyamideimide (PAI)/nanosilica (5 wt%) varnish and the second was anti-corona PAI/nanosilica (15 wt%) varnish. Insulation breakdown voltage was investigated under inverter surge condition at 20°C, 70°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, respectively. The insulation lifetime of the two layered coil was tens of times longer than that of original PAI coil. And the insulation lifetime decreased with increasing ambient temperature because there was weak binding strength between copper and varnish layer.

Keywords: Inverter surge, Insulation life estimation, Insulation life, Enamelled magnet wire, Double layer insulation coated

1. 서론

PAI (polyamideimide) 코일 선들은 열적 그리고 전기적 절연특성이 양호하다. 폴리아미드는 열적저항, 기계적강도 그리고 화학적 저항성을 갖는 일종의 고분자이다. 그러므로 폴리아미드 코일이 가혹한 환경조건하에서 사용되어지고 있다 [1-3]. 폴리아미드는 인버터 되먹임 모터 권선과 전원을 바꾸기 위한 고전압 코일에 사용된다. 최근에는 고속 스위칭을 허용하는 소자로서, 즉 IGBTs (insulated gate bipolar transistor)가 인버터 전원장치로 개발되어 왔다.

최근 여러 연구자들이 고분자 매트릭스 상에서 나노

크기 필러들의 응용에 관심을 가져왔다 [4-7]. 이유는 고분자 나노복합재료들은 나노가 들어가지 않은 원형 수지보다 더욱 향상된 절연 특성을 가지고 있기 때문이다. 그것은 역시 나노필러가 고분자의 전기적 그리고 기계적 특성 향상을 시킨다고 알려져 왔다.

환경적인 문제는 국제적, 국가적 그리고 지역적으로 에너지 효율 문제가 중요하게 대두되어 관심을 끌고 있다. 자동차 산업분야에서, 현재와 같이 많은 자동차의 증가는 오늘날 자동차 산업에서 요구된 고효율을 전달하기 위해, 인버터를 이용하여 적절한 속도를 구동해야한다.

인버터전원은 IGBTs를 갖는 PWM (pulse width modulation:펄스폭 변조)기술로 공급하는 것이 고속스위치 장치로서 이용되고 있다. 그리고 그것은 모터제어 성능을 향상시키고, 스위칭 손실을 줄여준다 [8,9].

본 연구에서는 이와 같은 고효율의 성능을 갖는 산업용 모터와 같은 산업에 적용하기 위하여, 4종류의

a. Corresponding author; jjpark@joongbu.ac.kr

코일을 개발하여 제조하였다. 즉, PAI원형, 나노 실리카 5 wt% 충전 분산된 바니시를 개발하여 1차 코팅한 코일위에 반-코로나성 나노 실리카 5 wt% 충전 분산된 바니시를 이용한 두 번째 절연층을 코팅한 이중층으로 구성된 절연층을 T/D (temperature and drying) 220°C, 240°C, 260°C 건조 온도 조건 하에서 경화시킨 3종류 코일을 인버터 서지와 온도 스트레스 20°C, 70°C, 100°C, 150°C, 200°C 그리고 250°C 온도 스트레스 환경 하에서 절연파괴 수명을 측정하여 가속절연 수명을 평가를 실시하였다.

2. 실험 방법

PAI 코일의 에나멜 절연층 두께가 30~50 μm이고, 각형구리코일의 두께와 폭은 각각 0.77~0.83 mm 그리고 1.17~1.23 mm를 Sam Dong Co.,Ltd.에서 제조하였다. 첫 번째 층은 고유연성 PAI원형 바니시에 5 wt% 나노 실리카를 충전 분산시킨 나노컴포지트로 코팅하였고 그리고 두 번째 층의 바니시는 코로나 방지용, 나노 실리카 충전함량 15 wt%를 완전 분산시킨 바니시로 코팅하여 각각의 온도조건 T/D : 220°C, 240°C, 260°C로 3종류의 경화조건으로 새로운 코일을 개발하였다.

본 연구에서는 개발된 4종류 코일의 절연 수명평가를 실시하였다. 실험 조건은 인가전원 및 주파수 1.5 kV/20 kHz의 인버터 서지 조건이 그림 1에서 나타난 전극에서 측정하였다.

측정은 감기어진 실린더형 전극에 밀착하여 접촉된 상태의 샘플에 인버터 서지 전원이 인가되었다. 감기어진 코일의 실린더형 전극의 지름이 5 mmφ로, 2회 감기어진 상태로 한쪽 단자의 코일 끝부분은 절연층을 제거하였고, 그 단자는 (+) 전원부에 연결되었다. 그리고 다른 한쪽 단자는 380 g의 하중을 갖는 추를 매달아 지지하였다 [16].

그림 2에서 나타난 인버터 서지의 파형 발생장치 (Model: APCP-12 kV-100, Sky Innotek Co. Ltd.)로부터 1.5 kV/20 kHz의 고전압 펄스 파형을 발생시켜, 코일 샘플에 인가되어졌으며, 동시에 온도 스트레스에 의한 가속 수명평가를 위해 온도 스트레스 변수 즉, 20°C, 70°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C 일정한 온도 조건하에서 실험이 실시되었고, 코일의 절연 수명이 끝날 때까지 일정한 조건에서 수행하였다.

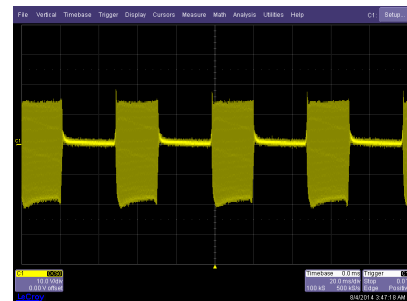


Fig. 1. Waveform of inverter surge.

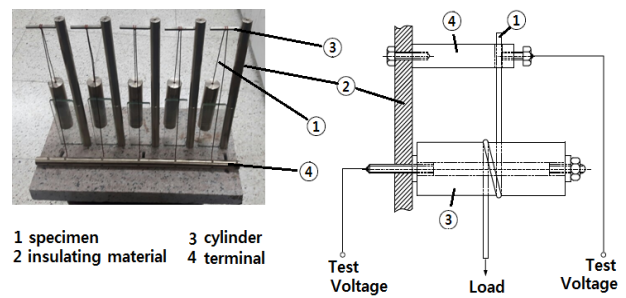


Fig. 2. Arrangement of cylinder and specimen for the breakdown voltage test.

Table 1. Type of samples.

Sample types	High flexible PAI vanish (nano silica contents : 5 wt%) + anti corona vanish (nano silica contents :15 wt%)	
	PAI original	coil diameter : 5 mmφ
Type_1	T/D : 220°C	coil diameter : 5 mmφ
Type_2	T/D : 240°C	coil diameter : 5 mmφ
Type_3	T/D : 260°C	coil diameter : 5 mmφ

Table 2. Experiment condition.

Temp	Stress level	Inverter surge condition	
		Voltage	Frequency
20°C	stress : No	1.5 kV	20 kHz
70°C	normal operating	1.5 kV	20 kHz
100°C	42% accelerated deterioration	1.5 kV	20 kHz
150°C	114% accelerated deterioration	1.5 kV	20 kHz
200°C	185% accelerated deterioration	1.5 kV	20 kHz
250°C	257% accelerated deterioration	1.5 kV	20 kHz

3. 결과 및 고찰

3.1 PAI 원형코일의 환경 온도에 따른 절연 수명 평가

그림 3과 표 3에서는 PAI (polyamideimide) 바니시를 구리도체에 코팅된 각형코일로서, 장시간 절연 수명을 평가하기 위하여 인공적으로 가속 수명평가를 실시하였다. 즉, 인버터 서지용 전원 전압은 1.5 kV, 인가주파수 20 kHz 조건하에서 가속열화를 위하여 온도의 구배가 거의 없는 항온조 내에서 온도 스트레스를 주지 않은 조건 즉, 인버터 서지만의 영향을 알기 위하여 현재 상태온도(20°C)로 설정하였다. 온도 스트레스 변수는 현실적인 사용 운전 조건과 같은 환경 온도 조건을 70°C로 하였고, 그 이상의 온도 스트레스 즉, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C로 설정하여 실시하였다. 다시 말해 70°C을 기준으로 했을 때, 100°C (42% 가속), 150°C(114% 가속), 200°C(185% 가속), 250°C(257% 가속) 열화를 실시하였다.

인버터 서지를 인가한 가속열화된 온도조건 하에서 PAI 원형코일의 절연 수명 결과를 와이블 플롯으로 나타내었고 그리고 그 결과를 표 3에서 형상 파라미터와 스케일 파라미터 그리고 B10수명과 같은 특성을 나타내었다. 가속 수명평가를 위한 파괴시간의 온도 스트레스 레벨에서 와이블 분포의 두 가지 파라미터가 결정된다. 와이블 분포의 누적확률은 식 (1)에서 주어진다 [4].

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

t: 시간, α 는 63.2 공칭 수명시간으로 스케일 파라미터로 표현한다. 그리고 β 는 형상파라미터 또는 분산 파라미터로서 기울기를 의미한 것으로 기울기가 크면 수명평가 결과의 균질성이 매우 높고, 기울기가 낮으면 균질성이 적은 것으로 표현한다. B10 수명의 경우, 누적확률분포에서 10%가 주어진 측정조건하에서 Fail이 일어날 수 있는 전기적 failure을 언급하는 것이다 [8].

상온 상태(20°C)에서는 형상파라미터(β)는 6.34의 기울기 정보를 나타내었고, 63.2%의 경우는 13.24 min의 절연 수명의 누적확률 값을 나타내었다. 그러나 가속하게 온도 스트레스가 주어짐으로 인하여 β 값도 낮아졌다. 즉, 기울기가 작아짐은 파괴되는 수명의 분포가 매우 넓게 분포됨을 의미한 것으로 균질성이 매우

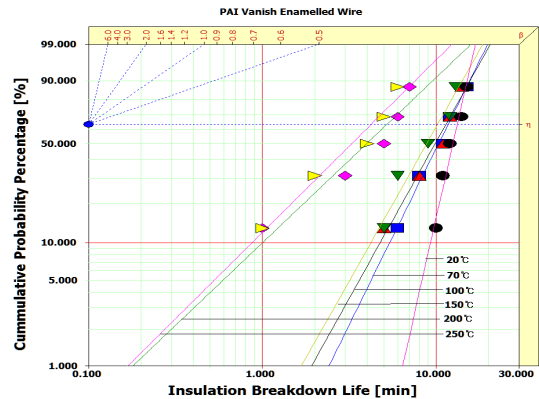


Fig. 3. Weibull plot for insulation breakdown life of PAI original coil.

Table 3. Parameter properties for Weibull plot of Fig. 3.

PAI original	Shape parameter	Scale parameter (m: in)	B10(min)
20°C	6.34	13.24	9.27
70°C	2.90	11.71	5.42
100°C	2.58	11.38	4.74
150°C	2.54	10.20	4.18
200°C	1.36	5.19	1.00
250°C	1.42	4.22	0.85

떨어진 결과이다.

또한 63.2%(스케일파라미터)가 작아짐은 역시 절연 수명이 짧아지는 결과를 나타낸 것이다. 결론적으로 150°C(114% 가속열화)를 기점으로 그 이상의 가속한 온도 스트레스에서는 β 값이 현격하게 낮아지고(1.36~1.42), 스케일파라미터 역시 70°C에 비하여 200°C : 2.26, 250°C : 2.77배 절연 수명이 상대적으로 짧은 결과를 얻었다.

3.2 Type_1 코일의 환경 온도에 따른 절연 수명 평가

그림 4, 표 4에서는 Type_1의 코일로서, 유연성이 좋은 PAI 바니시에 나노 실리카 5 wt%를 충전 분산시킨 나노복합체를 도체에 첫 번째 코팅하고, 두 번째로 코로나 방지용으로 나노 실리카 15 wt%을 PAI수지에 충전 분산시킨 바니시를 개발하여 이중층으로 코팅한 에나멜 와이어를 건조온도조건 T/D 220°C에서 경화시켜 제조된 코일을 샘플로 사용하였다.

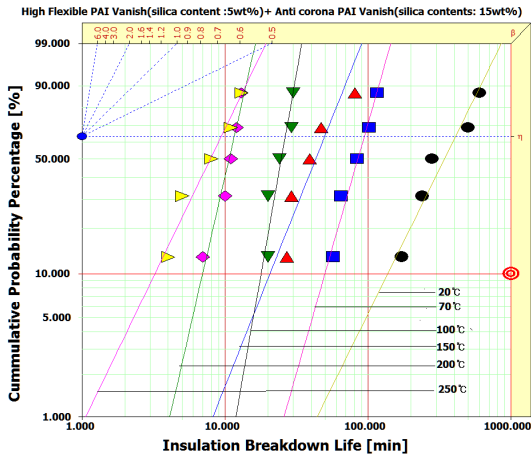


Fig. 4. Weibull plot for insulation breakdown life according to accelerated temperature stress of Type_1 coil.

Table 4. Parameter properties for Weibull plot of Fig. 4.

Type_1 coil	shape parameter	Scale parameter (min)	B10(min)
20°C	2.06	408.54	138.18
70°C	3.55	94.01	49.86
100°C	2.55	49.72	20.79
150°C	5.76	26.38	17.84
200°C	4.43	11.58	6.95
250°C	2.11	9.39	3.20

이중층으로 제조된 코일에 PAI 원형코일과 같은 조건의 인버터 서지와 가속 온도 스트레스(20°C, 70°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C)를 인가한 실험 결과, 절연 수명에 대한 와이블 플롯의 누적 확률분포 특성 결과를 나타내었다.

20°C 온도 스트레스의 경우는 실제로 인버터 서지의 전기적인 열화 결과만을 의미하는 주는 것이며, 열적 스트레스가 절연 수명에 영향을 주지 못한 경우로 63.2% (스케일파라미터)의 경우 408분의 절연 수명을 나타내었다. 그러나 코일을 모터에 적용되었을 때, 정상적인 온도 스트레스 환경(70°C)으로 기준을 정하였을 때, 절연 수명은 약 94분을 나타내었다. 온도 스트레스를 더욱더 가속한 조건 즉, 100°C(42% 가속), 150°C(114% 가속), 200°C(185% 가속), 250°C(257% 가속) 온도 스트레스가 더욱 더 가속한 조건의 환경이 될수록 절연 수명은 약 49분, 26분, 11분, 9분을 결과로 기록하였다.

나노 실리카 5 wt% 충전 분산된 나노복합지트를 도

체에 코팅한 층에 두 번째로 15 wt% 충전 분산시킨 바니시를 이중층으로 코팅한 에나멜코일의 장시간 절연 수명이 상온 상태(20°C)에서 PAI 원형코일의 수명과 비교하여볼 때 약 30.8배 긴 절연 수명의 결과를 얻었다. 그러나 정상적인 전동기 운전온도 70°C에서는 원형코일보다 약 8배 절연 수명이 길었다. 정상 운전 조건 보다 42% 가속열화시킨 100°C 환경에서는 원형에 비하여 4.4배 긴 수명의 결과를 얻었다. 그러나 114% 가속열화 환경 즉, 150°C에서는 원형코일에 비하여 2.6배로 급격하게 절연 수명이 떨어지는 결과이다. 또한 200°C, 250°C 가속한 온도 스트레스에서는 2.2배 높은 결과로서, 인버터 서지의 조건보다는 온도 스트레스로 인한 열화가 더욱더 절연 수명에 치명적인 결과를 가져온 것으로 사료된다.

3.3 Type_2 코일의 환경 온도 스트레스에 따른 절연 수명평가

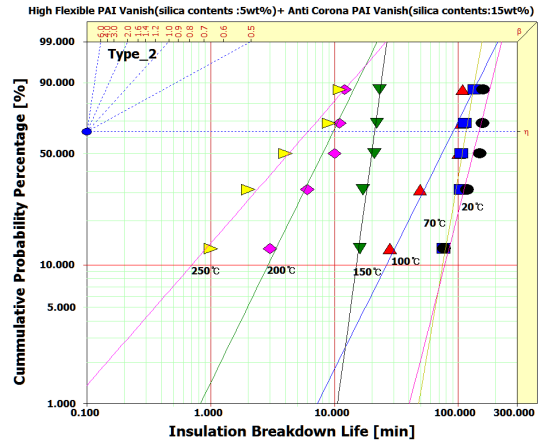


Fig. 5. Weibull plot for insulation breakdown life of Type_2.

Table 5. Parameter properties for Weibull plot of Fig. 5.

Type2	Shape parameter	Scale parameter(kV)	B10(kV)
20°C	3.56	146.62	77.20
70°C	5.19	115.66	74.73
100°C	1.82	90.58	26.14
150°C	6.68	21.09	15.12
200°C	1.86	9.76	2.93
250°C	1.04	6.08	0.69

그림 5, 표 5에서는 Type_2의 코일로서, Type_1 코일의 제조과정의 차이는 유연성이 좋은 PAI 바니시에 나노 실리카 5 wt%를 충전 분산시킨 복합지트를

도체에 첫 번째 코팅하고, 두 번째로 코로나 방지용으로 나노 실리카 15 wt%을 충전 분산시킨 바니시를 개발하여 이중층으로 코팅한 에나멜 와이어를 건조 온도 T/D : 240°C에서 경화되어 제조된 코일을 샘플로 사용한 것이다. Type_2의 코일의 경우 20°C 환경에서 PAI원형코일의 절연 수명과 비교하여볼 때, 146분의 절연 수명을 얻었다. 그러나 원형과 비교할 때 11배 긴 절연 수명을 나타내었다. 이것은 앞서 서술한 바처럼, 온도 스트레스가 적용되지 않은 경우로서 순수한 전기적 인버터 서지에 의한 수명의 결과이다.

그러나 정상적인 모터 운전 환경(70°C)에서는 약 115분의 절연 수명 결과를 얻었다. 원형코일과 비교하면 9.8배 긴 절연 수명을 나타내었다. 그 이상의 가혹한 온도 스트레스 환경인 100°C, 150°C, 200°C, 250°C의 경우와 비교하여 볼 때 7.95배, 2배, 1.88배 그리고 1.44배의 결과를 얻었다. 150°C(114% 가속열화)을 기점으로 온도 스트레스의 영향이 매우 큰 결과를 나타내고 있다. 이는 Type_1의 경우와도 유사한 절연 수명의 결과를 가져온 것이다.

3.4 Type_3 코일의 환경 온도에 따른 절연 수명 평가

그림 6, 표 6에서는 Type_3의 코일로서, 유연성이 좋은 PAI 바니시에 나노 실리카를 충전 분산시킨 나노컴포지트를 도체에 첫 번째 코팅하고, 두 번째로 코로나 방지용으로 나노 실리카 15 wt%을 충전 분산시킨 바니시를 개발하여 이중층으로 코팅한 에나멜 와이어를 T/D 260°C 건조온도에서 경화되어 제조된 코일을 샘플로 사용한 것이다.

Type_1, Type_2, Type_3과의 차이점은 제조 공정 시 최적의 건조온도의 조건을 220°C, 240°C, 260°C하였다. 그러나 역시 20°C 온도 환경에서는 PAI원형과 이중층으로 제조된 Type_3와 절연 수명 차이는 이중층 코팅된 코일이 원형코일보다 20배의 긴 절연 수명을 나타내었다. 또한 70°C의 온도 스트레스 하에서 이중층의 코일이 원형코일 보다 6.3배 긴 절연 수명을 나타내었다. 100°C, 150°C, 200°C, 250°C 가속된 온도 스트레스가 가혹 할수록 PAI 원형코일 보다 현격하게 낮아지는 절연 수명이 5.45배, 1.52배, 2.10배 그리고 2.10배로서 원형과 이중층의 코일과 거의 유사한 절연 수명의 결과를 얻었다. 이상의 결과를 분석하여볼 때, PAI 원형코일에서는 20°C~150°C 범위에서는 절연 수명의 차이는 크지 않았다. 그러나 3종류 Type T/D :

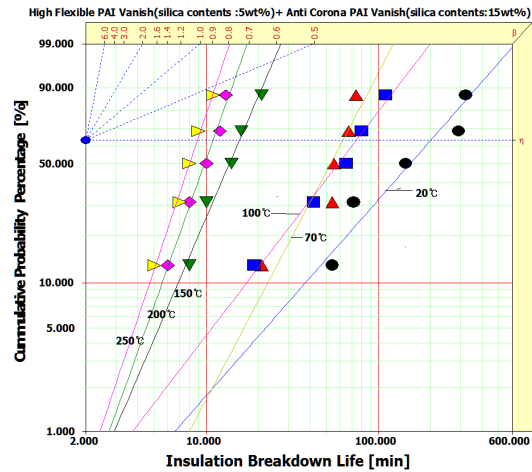


Fig. 6. Weibull plot for insulation breakdown life of Type_3.

Table 6. Parameter properties for Weibull plot of Fig. 6.

Type 3	Shape parameter	Scale parameter(kV)	B10(kV)
20°C	1.34	200.53	38.28
70°C	1.53	74.21	17.15
100°C	2.24	62.09	22.53
150°C	2.75	15.58	6.88
200°C	3.32	10.94	5.53
250°C	3.53	8.89	4.73

220°C, 240°C 260°C 건조온도에서 제조된 에나멜코일의 경우는 150°C(114% 가속열화)에서 매우 크게 절연 수명이 짧아지는 경향을 나타낸 것이다. 이는 PAI 원형코일 자체는 온도에 따라 유연성이 매우커서 도체와 수지와의 계면결합력을 유지하는 온도가 양호한 결과로 나타난 결과이다 [11,12].

그러나 이중층으로 제조된 나노 실리카 15 wt% 충전 분산된 바니시의 층이 구리금속과 고분자층의 열적 팽창계수가 상대적으로 커서 계면의 결함이 크게 나타났으며 [13,14], 장시간 동안 150°C 이상의 가혹한 온도 스트레스로 인한 박리된 결과로 절연 수명이 급격하게 저하되어 절연이 파괴되는 결과를 맞이한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 고유연성 PAI (polyamideimide) 수지에 나노 실리카를 충전 분산된 함량 5 wt%의 바니

시를 제조하여 1차로 도체에 절연층을 코팅하였고 그리고 그 위에 반 코로나성을 갖는 절연피막으로 PAI수지에 나노 실리카를 15 wt% 충전 분산시킨 바니시를 이용하여 이중층으로 표면을 코팅한 코일을 제조하였다. 건조온도 T/D의 조건 즉, 200°C, 240°C, 그리고 260°C로 건조시켜 제조된 코일에 인버터 서지(1.5 kV/20 kHz) 와 온도 스트레스(20°C, 70°C, 100°C, 150°C, 200°C, 그리고 250°C)을 동시에 복합적으로 열화를 주어 장기신뢰성 절연 수명평가를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Type_1, Type_2, Type_3 그리고 PAI 원형코일 4종류에 대한 상온상태인 20°C 상태에서 인버터 서지만을 주었을 때 원형코일과 이중층코일과 절연 수명평가 결과를 비교하여 볼 때 PAI 원형코일에 비하여 30배, 11배 그리고 15배의 큰 차이를 나타내었다. 이는 순수한 인버터 서지만의 경우는 PAI 원형코일에 비하여 매우 긴 절연 수명을 갖고 있음을 알았다.

2. 150°C(114% 온도 스트레스 가속열화)를 기점으로 200°C, 250°C 가혹한 온도 스트레스를 주어짐으로 절연 수명이 현격하게 감소되는 결론을 얻었다. 이는 반 코로나성을 위해 1차와 2차 나노 실리카를 5 wt% 그리고 15 wt% 충전 분산시켜 이중층으로 제조된 코일의 경우 구리금속과 절연피막이 고온부부에서 장시간 열화가 가속됨으로 금속과 고분자 계면에 박리현상과 열팽창계수로 인한 결함의 발생 결과로 현격하게 수명이 저하된 결론을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 2014년 산업통상자원부(MOTIE)의 지원(20131020000130)에 의해 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] H. Okubo, N. Hayakawa, and G. C. Montanari, *IEEE TRN S. DIELECTR. ELECTR. INSUL.*, **14**, 6, 1516-1530 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2007.4401236>]
- [2] H. Kikuchi and H. Hanawa, *IEEE TRNS. DIELECTR. ELECTR. INSUL.*, **19**, 1, 99-106 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2012.6148507>]
- [3] Y. Kikuchi, T. Murata, Y. Uozumi, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Wakimoto, and T. Yoshimitsu, *IEEE TRNS. DIELECTR. ELECTR. INSUL.*, **15**, 6, 1617-1625 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2008.4712665>]
- [4] E. Ildstad and S. R. Chalise, *Proc. IEEE Conf.* (2009) p. 85-88. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ceidp.2009.5377720>]
- [5] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, *IEEE Press Series on Power Engineering* (2004).
- [6] E. Sugimoto, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **5**, 1, 15-23, 1989. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/57.16949>]
- [7] Indian Standard Winding Wires-Test Methods Part 5 Electrical Properties (First Revision) ICS 29.060.10 (2012).
- [8] J. J. Park, Y. B. Park, and J. Y. Lee, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **12**, 93 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/TDEI.2011.12.3.93>]
- [9] Y. Kikuchi, T. Murata, Y. Uozumi, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Wakimoto, and T. Yoshimitsu, *IEEE TRNS. DIELECTR. ELECTR. INSUL.*, **15**, 6, 1617-1625 (2008) [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2008.4712665>]
- [10] H. Kikuchi and H. Hanawa, *IEEE TRNS. DIELECTR. ELECTR. INSUL.*, **19**, 1, 99-106 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2012.6148507>]
- [11] M. Q. Nguyen, D. Malec, D. Mary, P. Werynski, B. Gornicka, L. Therese, and Ph. Guillot, *Proc. IEEE Electrical Insulation Conference* (2009) p. 377-381.
- [12] M. Q. Nguyen, D. Malec, D. Mary, P. Werynski, B. Gornicka, L. Therese, and P. Guillot, *IEEE TRNS. DIELECTR. ELECTR. INSUL.*, **17**, 5 (2010).
- [13] G. Zhang, T. Lin, L. Zhang, and G. Wu, *Proc. IEEE International Conf.*, **2**, 904~907 (2004).
- [14] F. Guastavino and A. Ratto, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **28**, 4, 35-41 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2012.6232008>]