

REPORT

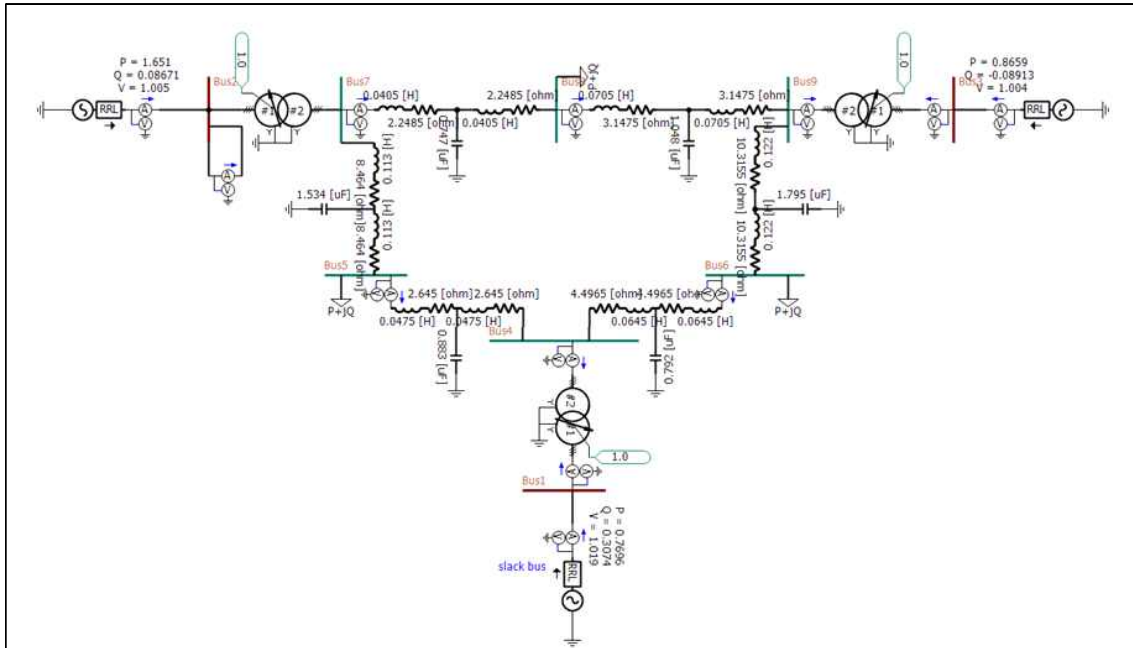
PSCAD 설계 보고서2



과목명	전력변환디바이스
담당교수	심재웅 교수님
학과	융합전자공학과
학년	3학년
학번	201910906
이름	이학민
제출일	2023.10.09.

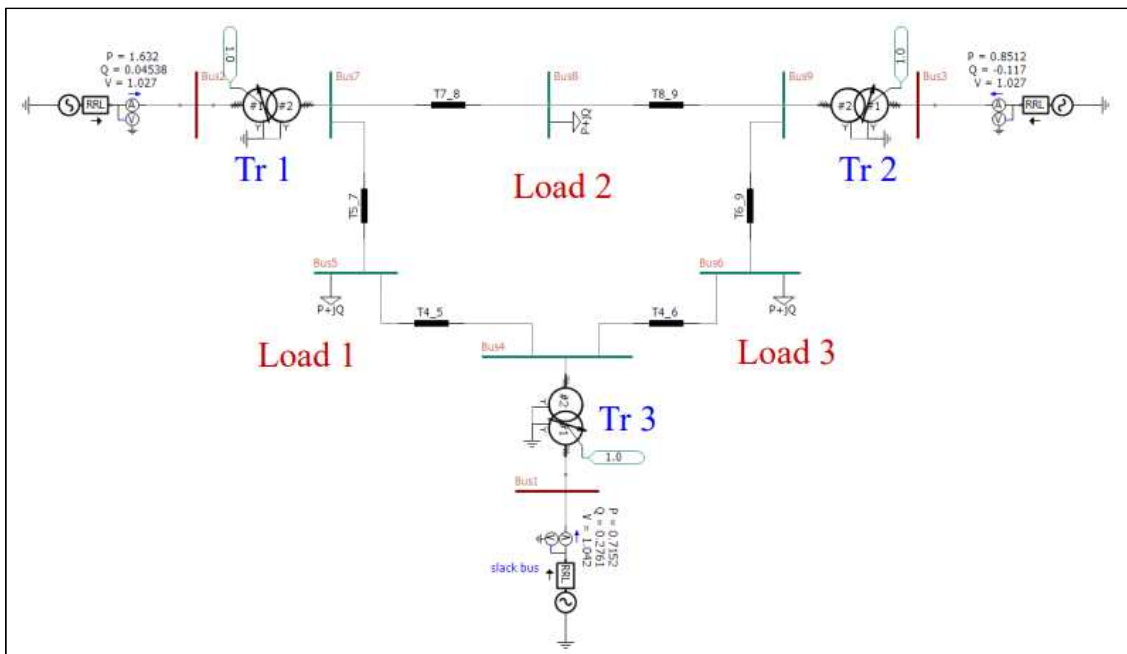
1. Example1

1) 회로도



PSCAD로 설계한 회로

2) 회로 정수 설정



T5_7

Definition Canvas (T5_8)
 Segment Name: T5_7
 Steady State Frequency: 60.0 [Hz]
 Length of Line: 0.001 [km]
 Number of Conductors: 3

Bergeron Model Options
 Travel Time Interpolation: On
 Reflectionless Line (ie Infinite Length): No

Manual Entry of Y,Z
 +ve Sequence R: 0.032 [pu/m]
 +ve Sequence XL: 0.161 [pu/m]
 +ve Sequence B: 0.368 [pu/m]
 0 Sequence R: -estimated-
 0 Sequence XL: -estimated-
 0 Sequence B: -estimated-

T4_6

Definition Canvas (T4_8)
 Segment Name: T4_6
 Steady State Frequency: 60.0 [Hz]
 Length of Line: 0.001 [km]
 Number of Conductors: 3

Bergeron Model Options
 Travel Time Interpolation: On
 Reflectionless Line (ie Infinite Length): No

Manual Entry of Y,Z
 +ve Sequence R: 0.017 [pu/m]
 +ve Sequence XL: 0.092 [pu/m]
 +ve Sequence B: 0.158 [pu/m]
 0 Sequence R: -estimated-
 0 Sequence XL: -estimated-
 0 Sequence B: -estimated-

T4_5

Definition Canvas (T4_7)
 Segment Name: T4_5
 Steady State Frequency: 60.0 [Hz]
 Length of Line: 0.001 [km]
 Number of Conductors: 3

Bergeron Model Options
 Travel Time Interpolation: On
 Reflectionless Line (ie Infinite Length): No

Manual Entry of Y,Z
 +ve Sequence R: 0.010 [pu/m]
 +ve Sequence XL: 0.068 [pu/m]
 +ve Sequence B: 0.176 [pu/m]
 0 Sequence R: -estimated-
 0 Sequence XL: -estimated-
 0 Sequence B: -estimated-

T6_9

Definition Canvas (T6_10)
 Segment Name: T6_9
 Steady State Frequency: 60.0 [Hz]
 Length of Line: 0.001 [km]
 Number of Conductors: 3

Bergeron Model Options
 Travel Time Interpolation: On
 Reflectionless Line (ie Infinite Length): No

Manual Entry of Y,Z
 +ve Sequence R: 0.0390 [pu/m]
 +ve Sequence XL: 0.1738 [pu/m]
 +ve Sequence B: 0.3580 [pu/m]
 0 Sequence R: -estimated-
 0 Sequence XL: -estimated-
 0 Sequence B: -estimated-

T7_8

Definition Canvas (TLine_1)
 Segment Name: T7_8
 Steady State Frequency: 60.0 [Hz]
 Length of Line: 0.001 [km]
 Number of Conductors: 3

Bergeron Model Options
 Travel Time Interpolation: On
 Reflectionless Line (ie Infinite Length): No

Manual Entry of Y,Z
 +ve Sequence R: 0.0085 [pu/m]
 +ve Sequence XL: 0.0576 [pu/m]
 +ve Sequence B: 0.1490 [pu/m]
 0 Sequence R: -estimated-
 0 Sequence XL: -estimated-
 0 Sequence B: -estimated-

T8_9

Definition Canvas (TLine_2)
 Segment Name: T8_9
 Steady State Frequency: 60.0 [Hz]
 Length of Line: 0.001 [km]
 Number of Conductors: 3

Bergeron Model Options
 Travel Time Interpolation: On
 Reflectionless Line (ie Infinite Length): No

Manual Entry of Y,Z
 +ve Sequence R: 0.0119 [pu/m]
 +ve Sequence XL: 0.1008 [pu/m]
 +ve Sequence B: 0.2090 [pu/m]
 0 Sequence R: -estimated-
 0 Sequence XL: -estimated-
 0 Sequence B: -estimated-

다음과 같은 기본 회로도와 조건에서 회로 정수를 계산할 수 있다.

$S_{base} = 100MVA$, $V_{baseLL} = 230kV$ 로부터 Z_{base} , Y_{base} 를 계산하면 다음과 같은 base 조건을 얻을 수 있다. 이후 base를 pu값과 곱하여 실제값을 계산한다.

구분	값	단위
S_base	100000000	[VA]
V_base(L-L)	230000	[V]
Z_base	529	[ohm]
Y_base	0.0018904	[ohm]
length	1	[m]
frequency	60	[Hz]

$$\begin{aligned}
 R_{actual} &= Z_{base} \times R_{pu} \\
 X_{L, actual} &= X_{L, base} \times X_{L, pu} \\
 B_{actual} &= Y_{base} \times B_{pu}
 \end{aligned}$$

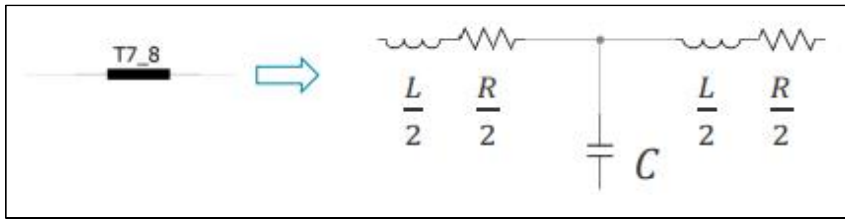
$$\begin{aligned}
 X_L &= wL \\
 L &= \frac{X_L}{w} \\
 L &= \frac{X_L}{2\pi f}
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 X_C &= \frac{1}{B} \\
 \frac{1}{wC} &= \frac{1}{B} \\
 wC &= B \\
 C &= \frac{B}{w} \\
 C &= \frac{B}{2\pi f}
 \end{aligned}$$

최종적으로 Inductance와 Capacitance를 구하기 위한 과정은 다음과 같다.

반복되는 과정을 빠르게 처리하기 위하여 MS EXCEL을 이용하였다.

T5_7		구분	값	단위		구분	값	단위
R_pu	0.032	R_actual	16.928	[ohm]		Resistance	16.928	[ohm]
XL_pu	0.161	XL_actual	85.169	[ohm]		Inductance	0.226	[H]
B_pu	0.306	B_actual	0.00057845	[Siemens]		Capacitance	1.53439E-06	[F]
T4_5		구분	값	단위		구분	값	단위
R_pu	0.01	R_actual	5.29	[ohm]		Resistance	5.290	[ohm]
XL_pu	0.068	XL_actual	35.972	[ohm]		Inductance	0.095	[H]
B_pu	0.176	B_actual	0.000332703	[Siemens]		Capacitance	8.82523E-07	[F]
T7_8		구분	값	단위		구분	값	단위
R_pu	0.0085	R_actual	4.4965	[ohm]		Resistance	4.497	[ohm]
XL_pu	0.0576	XL_actual	30.4704	[ohm]		Inductance	0.081	[H]
B_pu	0.149	B_actual	0.000281664	[Siemens]		Capacitance	7.47136E-07	[F]

T4_6		구분	값	단위		구분	값	단위
R_pu	0.017	R_actual	8.993	[ohm]		Resistance	8.993	[ohm]
XL_pu	0.092	XL_actual	48.668	[ohm]		Inductance	0.129	[H]
B_pu	0.158	B_actual	0.000298677	[Siemens]		Capacitance	7.92265E-07	[F]
T6_9		구분	값	단위		구분	값	단위
R_pu	0.039	R_actual	20.631	[ohm]		Resistance	20.631	[ohm]
XL_pu	0.1738	XL_actual	91.9402	[ohm]		Inductance	0.244	[H]
B_pu	0.358	B_actual	0.000676749	[Siemens]		Capacitance	1.79513E-06	[F]
T8_9		구분	값	단위		구분	값	단위
R_pu	0.0119	R_actual	6.2951	[ohm]		Resistance	6.295	[ohm]
XL_pu	0.1008	XL_actual	53.3232	[ohm]		Inductance	0.141	[H]
B_pu	0.209	B_actual	0.000395085	[Siemens]		Capacitance	1.04800E-06	[F]



각 송전선은 다음과 같은 등가회로이다.

최종 회로정수							
구분	T5_7	T4_5	T7_8	T4_6	T6_9	T8_9	단위
R/2	8.464	2.645	2.248	4.497	10.316	3.148	[ohm]
L/2	0.113	0.048	0.040	0.065	0.122	0.071	[H]
C	1.534E-06	8.8252E-07	7.4714E-07	7.9226E-07	1.795E-06	1.048E-06	[F]

따라서 설계한 회로에 최종적으로 대입해야 할 회로 정수는 다음과 같이 정리할 수 있다.

변압기 설계

- Tr 1

- Rating: 100 MVA (Y-Y)
- Leakage Percent Reactance: 6.25 %
- Voltage: 18kV/230kV
- Saturation Enabled: No

- Tr 2

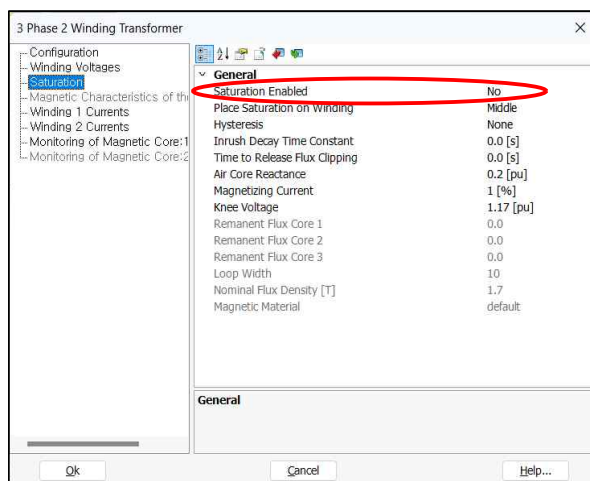
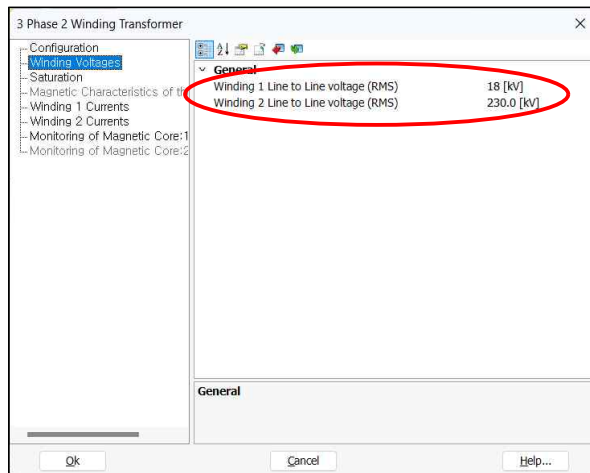
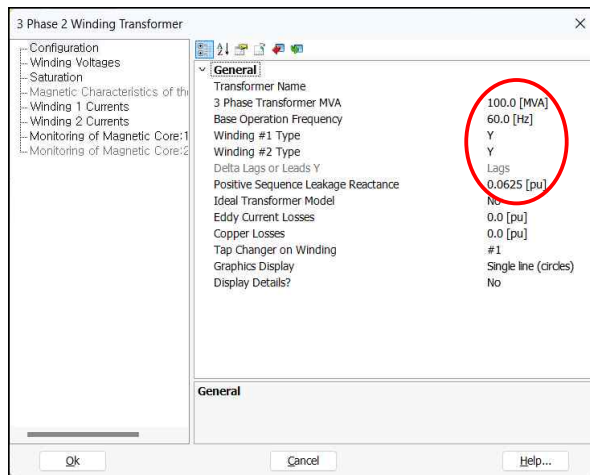
- Rating: 100 MVA (Y-Y)
- Leakage Percent Reactance: 5.86 %
- Voltage: 13.8kV/230kV
- Saturation Enabled: No

- Tr 3

- Rating: 100 MVA (Y-Y)
- Leakage Percent Reactance: 5.76 %
- Voltage: 16.5kV/230kV
- Saturation Enabled: No

변압기에서 Positive Sequence Leakage Reactance에 per unit으로 값을 설정하기 위하여 주어진 조건의 Leakage Percent Reactance [%]를 100으로 나누었다. 나머지 조건은 주어진 그대로 사용하였다.

예) Tr 1



Tr 2와 Tr 3도 같은 과정을 통해 설정하였다.

부하 설정

- Load 1

- Active Power: 125 MW
- Reactive Power: 50 MVARr
- Voltage (L-L): 230kV

- Load 2

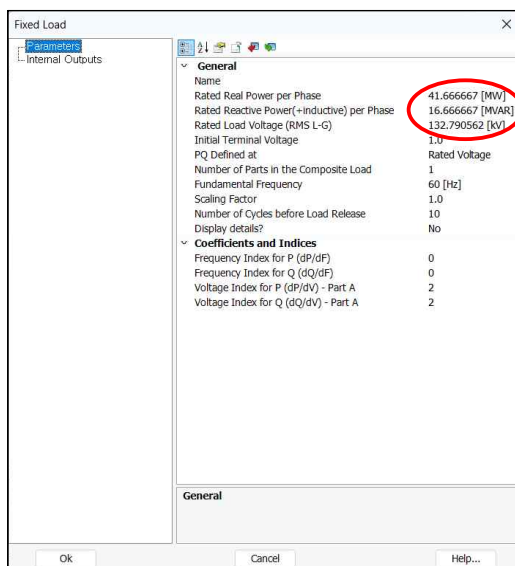
- Active Power: 100 MW
- Reactive Power: 35 MVAR
- Voltage (L-L): 230kV

- Load 3

- Active Power: 90 MW
- Reactive Power: 30 MVAR
- Voltage (L-L): 230kV

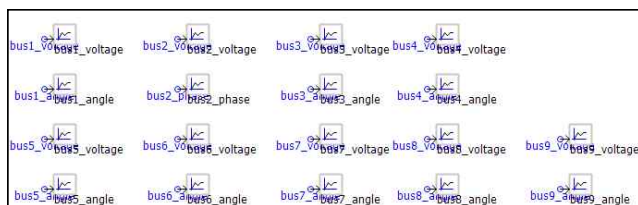
3 phase 기준으로 주어진 부하의 조건을 1 phase로 변환하기 위하여 Power는 3으로 나눈 값을 사용하였고 선간전압 대신 상전압을 사용하기 위하여 Voltage는 $\sqrt{3}$ 으로 나눈 값을 사용하였다.

예) Load 1



Load 2와 Load 3도 같은 과정을 통해 설정하였다.

3) PSCAD 시뮬레이션 결과



시간에 따른 각 전압과 위상의 파형의 그래프이다.

4) 결과 분석 및 결론

PSCAD 시뮬레이션 결과에서 얻은 그래프의 값을 읽어 정리하면 다음과 같다.

Bus Number	Rated Voltage	Voltage(측정값)	Voltage in pu	Angle(측정값)
Bus 1	16.5	17.0513	1.0334	-0.1218
Bus 2	18	18.3358	1.0187	9.2138
Bus 3	13.8	14.0406	1.0174	4.9361
Bus 4	230	234.1580	1.0181	-2.3868
Bus 5	230	228.3140	0.9927	-3.8364
Bus 6	230	230.9730	1.0042	-3.8071
Bus 7	230	234.4180	1.0192	3.5697
Bus 8	230	232.0100	1.0087	1.0349
Bus 9	230	235.6340	1.0245	2.1850

Voltage in pu는 측정값에서 Rated Voltage로 나누어 계산하였다.

문제에서 주어진 데이터 값과 실제 측정 결과 사이의 차이를 분석하면 다음과 같다.

Bus Number	비교값		오차	
	Voltage in pu	Angle	Voltage in pu (오차율)	Angle (단순 차이)
Bus 1	1.04	0	0.6334%	0.1218
Bus 2	1.025	9.3507	0.6190%	0.1369
Bus 3	1.025	5.142	0.7381%	0.2059
Bus 4	1.02531	-2.2174	0.7053%	0.1694
Bus 5	0.99972	-3.6802	0.7052%	0.1562
Bus 6	1.01225	-3.5666	0.7923%	0.2405
Bus 7	1.02683	3.7961	0.7422%	0.2264
Bus 8	1.01727	1.3373	0.8386%	0.3024
Bus 9	1.03269	2.4448	0.7935%	0.2598

두 결과를 비교하였을 때, 시뮬레이션을 통해 얻은 결과가 Voltage in pu는 주어진 데이터에 비해 0.7% 내외의 오차율을, Voltage angle은 약 0.1~0.3° 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

PSCAD 시뮬레이션을 통한 결과와 주어진 문제의 결과가 거의 일치하므로 시뮬레이션이 성공적으로 이루어졌다.

Number of Breaker Operations는 해당 논리의 STATE가 몇 번 바뀌는지를 나타내는 값이고 1로 설정하였다. 그림①과 같이 Initial State를 Open으로 설정하면 초기 Open 상태에서 1번만 논리가 변화하여 정상상태에서 Close 상태가 되므로 STATCOM이 연결된 효과를 가질 수 있다. 반대로 그림②와 같이 Initial State를 Close로 설정하면 정상상태에서 Open 상태이므로 STATCOM이 미연결된 효과를 가진다.

(2) THD (Total Harmonic Distortion, 전고조파왜율)

- THD의 정의 : $THD = \frac{\text{전고조파의 실효값}}{\text{기본파의 실효값}}$

$$- THD_v = \frac{V_H}{V_1} = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} V_n^2}{V_1^2}}$$

- THD는 전압에서 많이 쓰인다.

(3) TDD (Total Demand Distortion, 총수요왜형율)

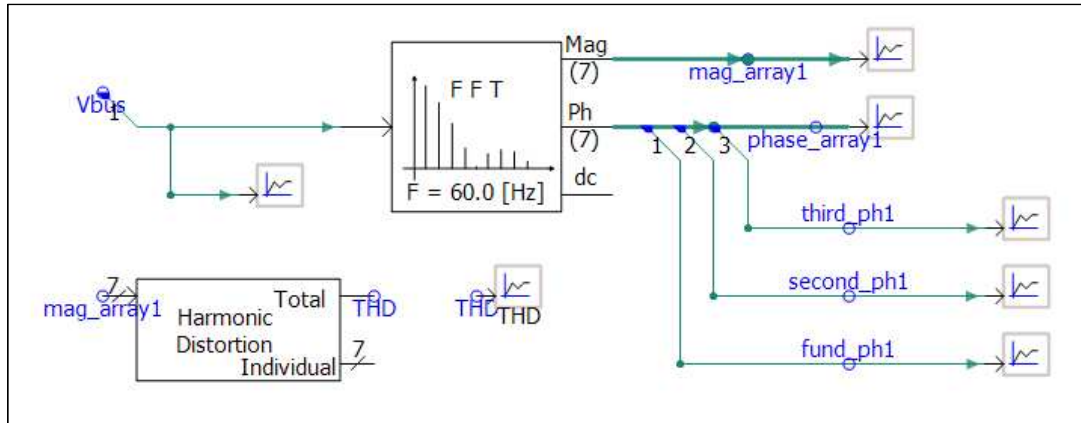
- TDD의 정의 : $TDD = \frac{\text{전고조파의 실효값}}{\text{최대(정격)실효값}}$

$$- TDD_i = \frac{I_H}{I_{peak}} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_{peak}} = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_n^2}{I_{peak}^2}}$$

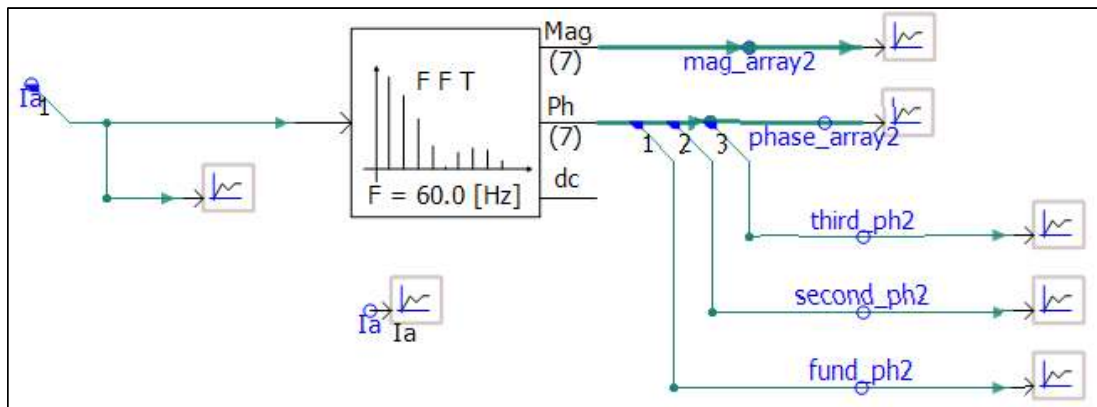
- TDD는 전류에서 많이 쓰인다.

3) PSCAD 시뮬레이션 결과

앞서 기술한 STATCOM 연결 제어 방식과 THD, TDD의 정의를 바탕으로 시뮬레이션 결과를 나타내면 다음과 같다.



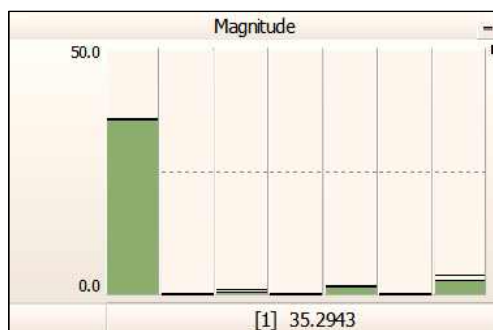
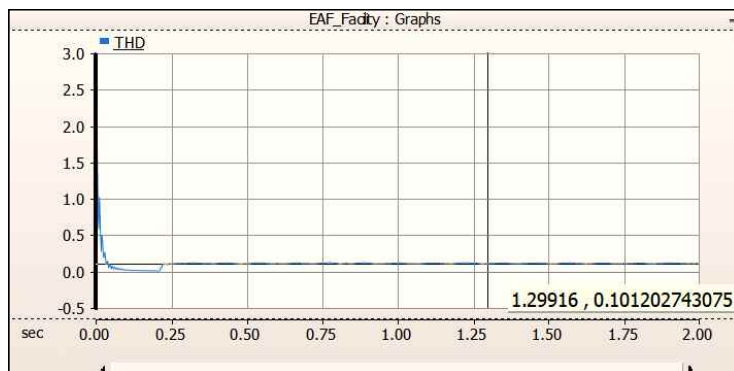
THD 고조파 분석을 위하여 설계한 FFT 시뮬레이션 소자는 다음과 같이 구성되어 있다. mag_array1 그래프를 통해 Vbus 신호의 제 n차 고조파 Magnitude 값을 알 수 있다.



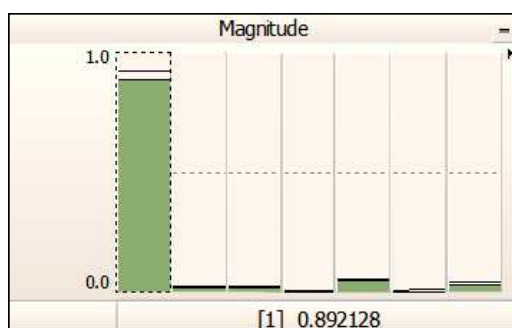
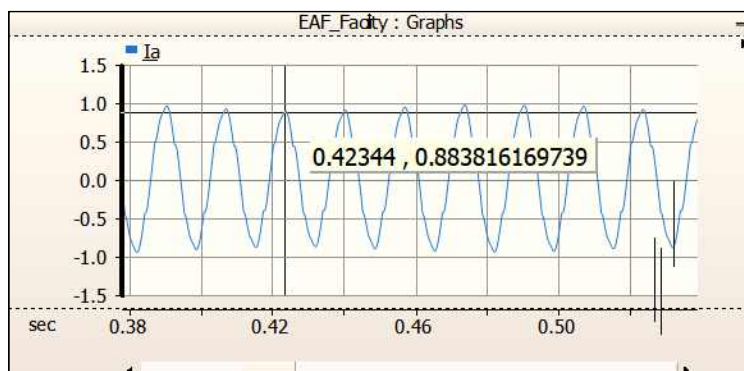
TDD 고조파 분석에는 I_{peak} 와 고조파의 실효값이 필요하므로 다음과 같이 구성하였다. Ia 신호의 제 n차 고조파 Magnitude 값은 mag_array2 그래프를 통해 얻을 수 있고, Ia 그래프의 최댓값을 $\sqrt{2}$ 로 나누어 I_{peak} 의 실효값을 얻는다.

주어진 문제의 THD 또는 TDD의 값을 얻기 위하여 전압 THD의 경우 THD 자체 그래프와 고조파의 Magnitude 그래프를, 전류 TDD의 경우 Ia 그래프와 고조파의 Magnitude 그래프를 출력하였다.

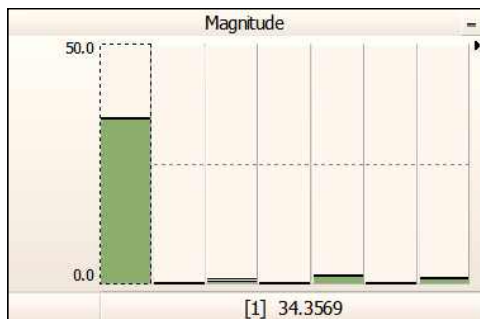
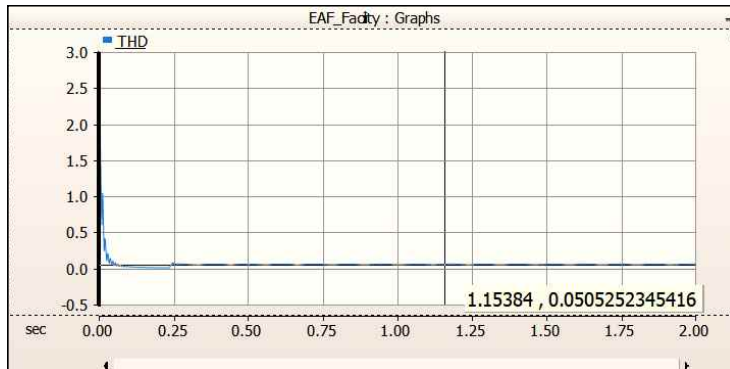
① STATCOM 연결 시 전압 THD



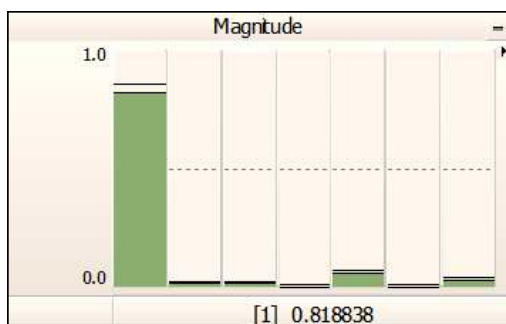
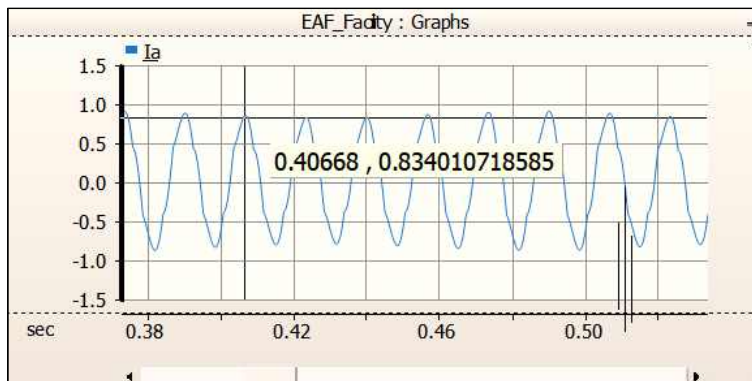
② STATCOM 연결 시 전류 TDD

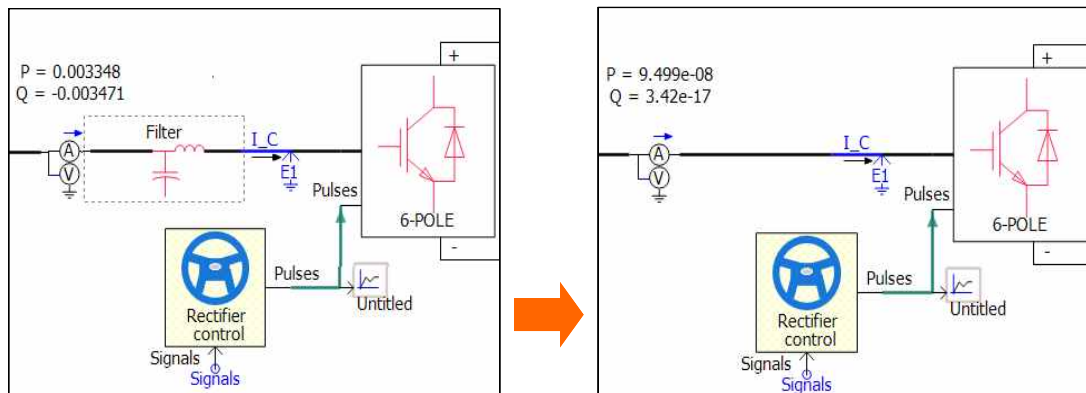


③ STATCOM 미 연결 시 전압 THD



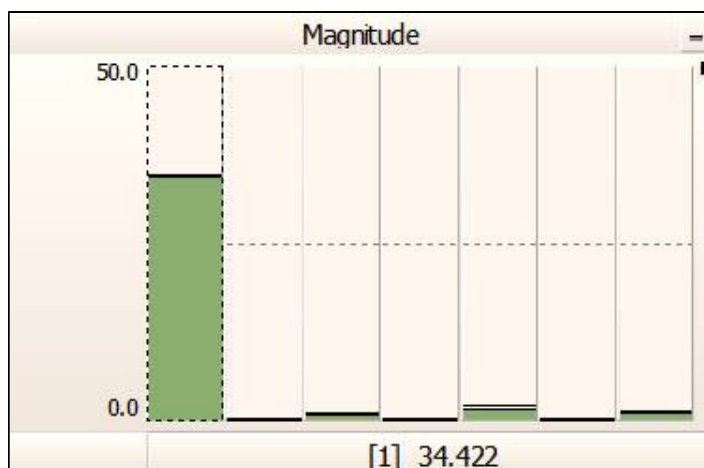
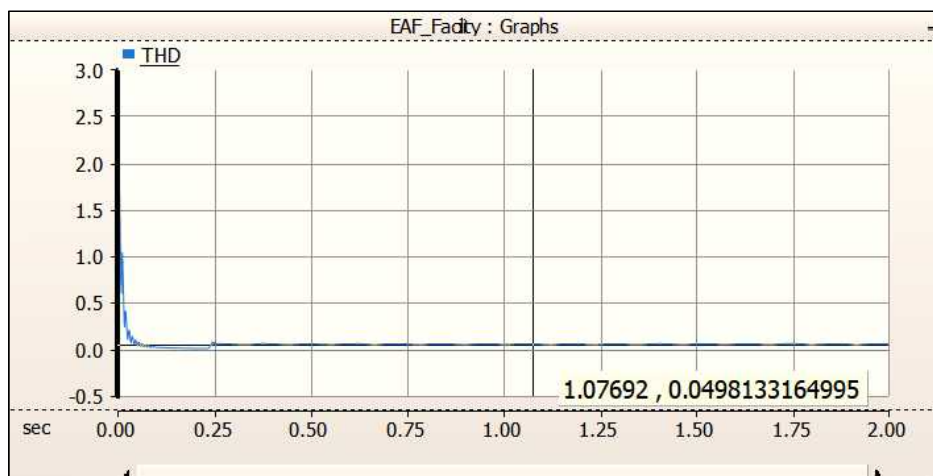
④ STATCOM 미 연결 시 전류 TDD



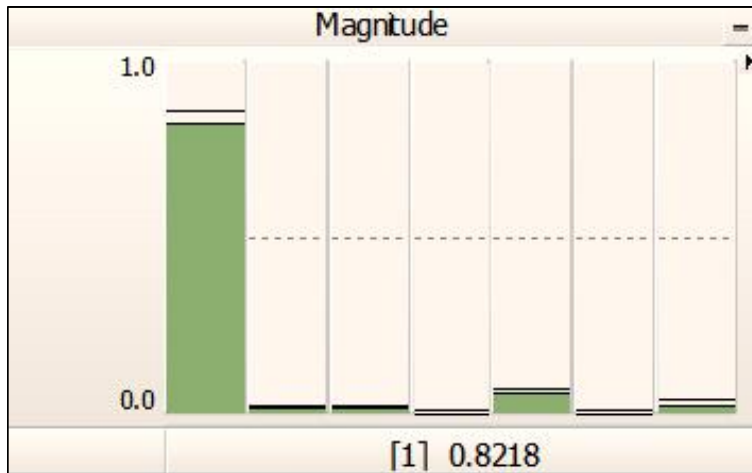
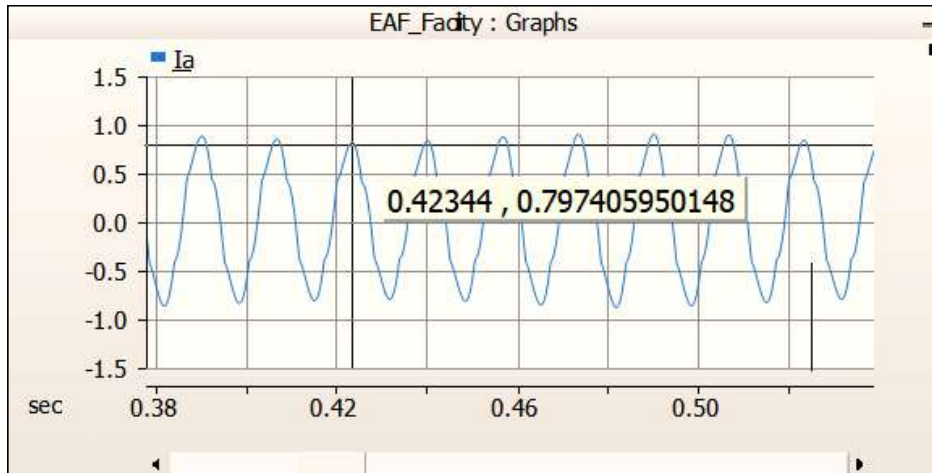


필터를 제거한 회로는 오른쪽 그림과 같다.

⑤ STATCOM 미연결/필터 제거 시 전압 THD



⑥ STATCOM 미연결/필터 제거 시 전류 TDD



①~⑦ 그래프에서 얻은 값은 최종적으로 결과 분석에서 전압 THD와 전류 TDD를 구하는데 사용된다.

4) 결과 분석 및 결론

앞서 보인 3) ①~⑦에서 출력한 그래프를 바탕으로 얻은 값을 엑셀에 정리하면 다음과 같다.

1. STATCOM 연결 시 전압 THD			3. STATCOM 미 연결 시 전압 THD			5. STATCOM 미 연결/필터 제거 시 전압 THD		
n	V _n	THD	n	V _n	THD	n	V _n	THD
1	35.2943	0.101324	1	34.3569	0.050917	1	34.422	0.050177
2	0.036914		2	0.052111		2	0.049002	
3	0.257551		3	0.381844		3	0.344948	
4	0.07855		4	0.088153		4	0.098585	
5	1.49307		5	1.49889		5	1.47156	
6	0.207167		6	0.016876		6	0.028971	
7	3.23156		7	0.810525		7	0.828078	

2. STATCOM 연결 시 전류 TDD			4. STATCOM 미 연결 시 전류 TDD			4. STATCOM 미 연결/필터 제거 시 전류 TDD		
n	I _n	TDD	n	I _n	TDD	n	I _n	TDD
L _{peak}	0.624941	0.079361	L _{peak}	0.589727	0.10730506	L _{peak}	0.563847	0.110123597
2	0.010681		2	0.00952		2	0.008149	
3	0.006544		3	0.009307		3	0.010828	
4	0.004425		4	0.002855		4	0.003981	
5	0.040161		5	0.056317		5	0.055327	
6	0.001649		6	0.002426		6	0.000738	
7	0.025839		7	0.025328		7	0.02438	

앞서 설명한 THD와 TDD의 정의에 따라 값을 계산하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.
THD의 경우 그래프에서 직접 읽은 값과 엑셀에서 계산한 값이 일치하므로 올바른 시뮬레이션 수행하였음을 알 수 있다.

PSCAD를 통해 얻은 값을 엑셀로 정리하여 계산한 전압 THD와 전류 TDD의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 전압 THD

STATCOM 연결 시 : 0.101324

STATCOM 미연결 시 : 0.050917

STATCOM 미연결 + 필터 제거 시 : 0.050177

(2) 전류 TDD

STATCOM 연결 시 : 0.079361

STATCOM 미연결 시 : 0.10730506

STATCOM 미연결 + 필터 제거 시 : 0.110123597

STATCOM을 미연결하면 전압 THD는 감소하고, 전류 TDD는 증가함을 알 수 있다. 필터 제거를 추가했을 경우 전압 THD는 미미하게 감소하고, 전류 TDD는 미미하게 증가하였다.